



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

ANALÝZA A OPTIMALIZACE PROCESU VÝROBY
VÝVOJOVÝCH VZORKŮ
ANALYSE AND OPTIMALISE PRODUCTION PROCESS OF PROTOTYPES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Tomáš Hamr

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Tomáš Hamr

ID: 164727

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Analýza a optimalizace procesu výroby vývojových vzorků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku procesu výroby vývojových vzorků. Soustřeďte se zejména na požadovanou kvalitu. Zpracujte metodiku na hodnocení kvality neosazených i osazených DPS a na sledování změn parametrů součástí za různých environmentálních vlivů v automotive prostředí (elektromigrace aj.). Vycházejte z mezinárodních norem.

Dle zpracované metodiky proveďte analýzu kvality dodaných neosazených DPS i osazených DPS (strojově i ručně) od různých výrobců. Sledujte i vliv teplotního namáhání na osazené DPS. Podle technologických možností proveďte porovnání pomocí rentgenu, termokamery, mikrovýbrusů aj.

Na základě provedených experimentů i dosažených výsledků z interní laboratoře i od externích dodavatelů proveďte vyhodnocení i doporučení pro zdokonalení procesu i pro kontrolu technických parametrů.

Práce je realizována ve spolupráci s oddělením EEG na R&D Automotive Lighting Jihlava.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 21.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultant: Ing. Josef Vochyán Ph.D .

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

V této diplomové práci jsou shrnuty základní poznatky o problematice výroby vývojových vzorků DPS. Důraz je kladen zejména na požadovanou kvalitu, která vychází z uvedených norem. Teoretická část obsahuje metodiku na hodnocení kvality neosazených DPS, na osazení a pájení, na sledování změn parametrů součástek za různých environmentálních vlivů. Praktická část je realizována ve spolupráci s oddělením EEG na R&D Automotive Lighting Jihlava. První část je věnována návrhu a vyhotovení vývojových vzorků zhotovených v interní laboratoři, u kterých je následně vyhodnocena kvalita pomocí stanovené metodiky z teoretické části. Další část práce se zabývá analýzou kvality dodaných neosazených a osazených DPS od různých výrobců dle norem IPC-A-600 a IPC-A-610. Pomocí klimatických testů je pozorována materiálová stálost, kvalita pájení a další možné vzniklé defekty. Prostřednictvím rentgenu, mikrovýbrusu, termokamery a dalších metod jsou desky analyzovány a na základě výsledků je určen aktuální stav vývojových vzorků na R&D AL a jsou předána doporučení pro případné zlepšení.

Klíčová slova

Led driver, IPC standardy, defekty, metalografie, rentgen, teplotní management, automotive prostředí.

Abstract

This diploma thesis summarizes basic findings about issues of making development samples of PCB. The emphasis is especially on required quality which complies with mentioned norms. The theoretical section includes methodology for evaluating quality non-mounted boards, assembling and soldering, parameters of components under different environmental circumstances. The practical part is carried out in cooperation with the department EEG in R&D Automotive Lighting Jihlava. The first part is dedicated to the design and the preparation of development samples which were made in an internal laboratory of AL. Their quality is assessed according to given methodology from the theoretical part. The second part deals with analysis of quality of delivered mounted and non-mounted PCB from different producers according to standards IPC-A-600 a IPC-A-610. Material constancy, the quality of soldering and other possible, arisen defects are observed by using climatic tests. PCBs are analyzed by an X-ray, metallographic grinding, a thermal imaging camera and other methods. The recommendations for further improvements are given and based on results of the tests. Moreover, the topical condition of development samples is determined in R&D in the company Automotive Lighting.

Keywords

LED driver, IPC standards, defects, metallography, an X-ray, temperature management, automotive environment

Bibliografická citace:

HAMR, Tomáš. *Analýza a optimalizace procesu výroby vývojových vzorků*. Brno, 2019. XX s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza a optimalizace procesu výroby vývojových vzorků jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Jiřímu Starému Ph.D. za poskytnuté studijní materiály a odborné vedení při zpracování diplomové práce. Zároveň bych chtěl poděkovat panu Ing. Josefu Vochyánovi, Ph.D. za odbornou pomoc při plnění praktické části práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU SOUVISEJÍCÍ S VÝVOJOVÝMI VZORKY..10	
2 ZÁKLADNÍ NORMY IPC PRO DPS	12
3 HODNOCENÍ KVALITY NEOSAZENÝCH DPS A POUŽITÁ METODIKA DLE IPC NOREM	13
3.1 PROCES METALOGRAFICKÉHO VÝBRUSU PRO VYHODNOCOVÁNÍ DPS.....	13
3.1.1 <i>Dělení materiálů a zalévání vzorků pro mikrovýbrus</i>	<i>14</i>
3.1.2 <i>Zalévání vzorků</i>	<i>15</i>
3.1.3 <i>Zalévání za studena</i>	<i>15</i>
3.1.4 <i>Zalévání za tepla</i>	<i>16</i>
3.1.5 <i>Metalografická příprava</i>	<i>16</i>
3.2 VRTÁNÍ, ZAČIŠTĚNÍ OTVORŮ	17
3.3 GALVANICKÉ POKOVENÍ OTVORŮ A CEST	18
3.4 NEPÁJIVÁ MASKA.....	20
3.5 POVRCHOVÉ ÚPRAVY.....	21
4 HODNOCENÍ KVALITY OSAZENÝCH DPS A POUŽITÁ METODIKA DLE IPC NOREM	22
4.1 RENTGENOVÁ KONTROLA PRO VYHODNOCOVÁNÍ SPOJŮ	22
4.2 SMÁČIVOST, PÁJENÍ.....	24
4.3 ELEKTROMIGRACE KOVU	27
4.3.1 <i>Síly ovlivňující pohyb iontů</i>	<i>27</i>
4.3.2 <i>Rozdělení elektromigrace</i>	<i>27</i>
4.3.3 <i>Mechanismy defektů vznikajících elektromigrací</i>	<i>29</i>
4.3.4 <i>Důsledky elektromigrace v praxi</i>	<i>30</i>
4.4 ODOLNOST VŮČI ENVIRONMENTÁLNÍM VLIVŮM	30
4.4.1 <i>Popis klimatické komory VCS 4080-10</i>	<i>31</i>
4.5 TERMOKAMERA	32
5 PRAKTICKÁ ČÁST	33
5.1 NÁVRH VZORKŮ PRO TESTOVÁNÍ	33
5.2 VÝROBA VZORKŮ V INTERNÍ LABORATOŘI AL	36
5.3 TECHNIKA PROVEDENÍ MIKROVÝBRUSU	37
5.4 VYHODNOCENÍ VZORKŮ Z LABORATOŘE AL	40
5.5 VYHODNOCENÍ MIKROVÝBRUSU NA VZORCÍCH AL	41
5.5.1 <i>Sledování stálosti procesu:</i>	<i>44</i>
5.6 DPS OD EXTERNÍCH DODAVATELŮ	46
5.7 PROCES OSAZOVÁNÍ	53
5.7.1 <i>Technologické možnosti</i>	<i>54</i>

5.7.2	<i>Kontrola procesu osazování a pájení</i>	55
5.8	KLIMATICKÉ TESTY	60
5.9	OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ VZORKŮ TERMOKAMEROU	67
ZÁVĚR	69
Seznam použitých zdrojů		
Seznam symbolů a zkratek		
Seznam obrázků		
Seznam tabulek		

Úvod

Desky plošných spojů zkráceně DPS nebo PCB jsou v dnešní době nepostradatelnou součástí všech přístrojů a zařízení pro běžný život. Základní elektronické přístroje, které nás obklopují, mohou být například mobilní telefony, televize, počítače apod. Většinou to jsou produkty, u nichž se na vizuální nedokonalosti DPS neklade důraz. Nicméně v tomto odvětví je mnoho elektronických součástí, kde musí být desky plošných spojů naprosto dokonalou záležitostí. Hlavně v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu jsou na desky kladeny vysoké požadavky.

Základem dnešních světlometů jsou pokročilé elektronické moduly, z nichž většina zahrnuje technologii LED diod a jejich správnou funkci zajišťují DPS. Inteligentní světlomety zvládají mnoho nadstandardních funkcí, které jsou vykoupěny rozšiřováním desky plošného spoje, nárůstem vrstev a přibývajících součástek a s tím související větší riziko poruch. Z tohoto důvodu je kladen obrovský důraz na kvalitu a zpracování DPS.

Inteligentní LED světlomety jsou schopné měnit svoji intenzitu a tím se přizpůsobit okolnímu prostředí. V podstatě je snaha zajistit osvětlení silnice podobající se dennímu světlu za jakýchkoliv okolností, aniž by docházelo k oslňování ostatních účastníků silničního provozu. Světlomety se také natačí ve směru jízdy. Díky získaným informacím z navigačního systému si dokáže světlomet přisvětlit zatáčku ještě před tím, než řidič otočí volantem. Mezi další moderní funkce světlometu patří neoslňující dálková světla, která umožňují řidiči využít celý potenciál světlometu i v plném provozu. Aby se zachovala spolehlivost těchto zmíněných funkcí, je třeba desky DPS před uvedením do sériové výroby řádně testovat a optimalizovat.

Tato práce se je zaměřena na metodiku testování parametrů kvality pájených spojů stanovených normou IPC-A-610 a pro kvalitu samotné desky danou normou IPC-A-600. Budou rozebrány 3 různé vzorky od externích dodavatelů a vyhodnoceny nedokonalosti výrobních postupů jednotlivých firem. Desky budou podléhat různým kontrolám, od nejzákladnější vizuální kontroly, přes kontrolu pod mikroskopem, až ke kontrole rentgenem, termokamerou a mikrovýbrusem.

Další striktně sledovaný faktor je teplotní management, kterým se práce bude také zabývat. Jelikož s přehříváním LED čipů jejich životnost prudce klesá, vzniká riziko tavení plastů, kontaminace LED diod a v neposlední řadě případného vzplanutí desky.

Práce je realizována v R&D Automotive Lighting a má za úkol zrevidovat a zanalyzovat na jaké úrovni se zhotovují vývojové vzorky. Zároveň má na základě zhodnocení stávajících výrobních postupů předložit doporučení pro případná vylepšení.

1 Analýza současného stavu související s vývojovými vzorky

Při velkosériové výrobě automobilů a také díky požadavkům zákazníka dochází ke kontinuální modernizaci celého vozu, což má za následek zvyšování spotřeby elektrické energie vozu při provozu. Zvýšení spotřeby lze vyřešit zvýšením výkonu alternátoru a kapacitou baterie. Ale toto řešení je z hlediska životního prostředí nejméně vhodné. Za řešení lze považovat zvýšení účinnosti použitých zařízení v automobilu, takže zůstane stejná energetická náročnost a zároveň se zvýší jízdní komfort.

Původně plnily funkce světlometu halogenové žárovky, které později nahradily xenonové výbojky. U halogenové žárovky (obr. 1) se dosahuje vyšší teploty vlákna a delší životnosti tím, že se do atmosféry uvnitř baňky přidá sloučenina halového prvku (halogen tj. brom nebo jod). Její hlavními nevýhodami jsou vysoký potřebný příkon proudu, nízký výkon, úzký svazek světla a při špatném seřízení mohou oslňovat. Xenonové výbojky (obr. 2) jsou plněny inertním plynem xenonem pod tlakem až 2,5 MPa. Při provozu se tlak ještě zvyšuje až k 7,5 MPa. Zdrojem světla je oblouk mezi wolframovými pevně ukotvenými elektrodami. Zážeh oblouku zajistí impuls vysokého napětí o hodnotě až 60 000 V. Jejich nevýhodami je hlavně vyšší cena, nutnost výměny ve specializovaném servisu, nelze vytvořit vhodné šikmé osvětlení i pro krajnici vozovky a rtuť ve výbojce představuje nebezpečný materiál.



Obrázek 1:
Halogenová žárovka
[23]

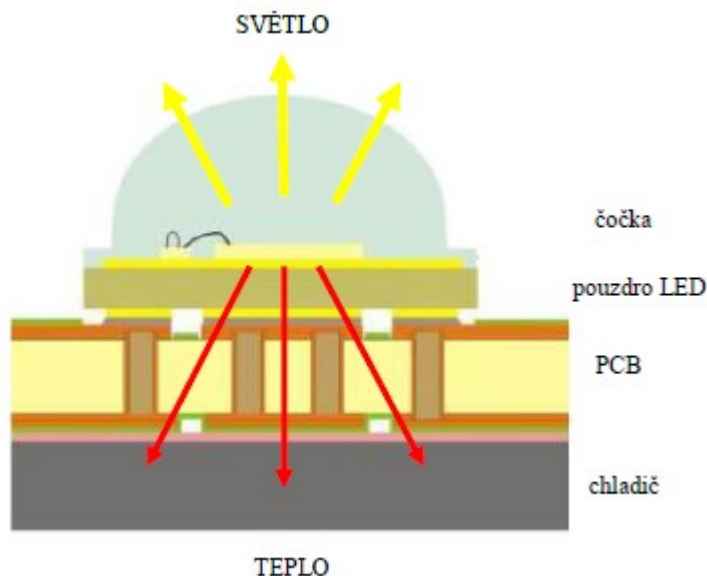
V dnešní době se halogenové žárovky a xenonové výbojky nahrazují LED diodami hlavně z důvodu vyšší účinnosti. LED diody produkují více světla, až dvaapůlkrát více než halogenové žárovky. Mohou vyzařit světlo v požadované vlnové délce bez použití barevných filtrů, tzn. že vydávají světlo blízké dennímu. Umístění diody může být navrženo k soustředění světla na určité místo, nepotřebují tedy nezbytně optickou soustavu. Při útlumu světla, když dojde ke snižování napájecího proudu, nemění svou barvu. Dobře snášejí časté zapínání a vypínání a s tím souvisí i jejich dlouhá životnost, tudíž jsou tyto světlomety zcela bezúdržbové ale je nutné je projektovat na celou životnost vozu. Další výhodou je rychlý nástup plné intenzity osvětlení, proto není třeba tzv. startéru.



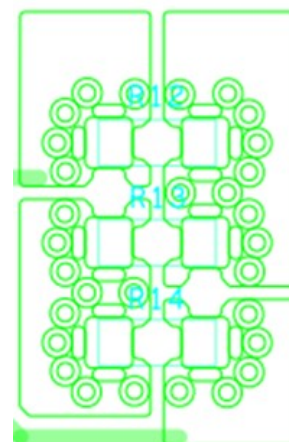
Obrázek 2:
Xenonová výbojka
[23]

Ve všech zdrojích světelného záření vzniká při přeměně elektrické energie na světlo tepelná energie a stejně tomu je u systémů osazených LED diodami. Nicméně by tyto diody neměly pracovat ve vysoké teplotě, protože poté klesá jejich životnost a svítivost. Maximální povolená teplota na čipu bývá stanovena výrobcem pro každý elektronický komponent, běžně se pohybuje do 150 °C. Z těchto důvodů je nutností uvolňované teplo dostatečně odvádět. Aby bylo zajištěno dostatečné chlazení LED diody (obr. 3), používají se termální plošky vyrobené z mědi, jejichž účinnost chlazení se zvyšuje chladicími otvory čili prokovy (obr. 4). Další nedílnou částí přispívající k dokonalému odvodu tepla je teplovodivá pasta s chladičem, který bývá umístěný pod deskou. Na vyrobených vývojových deskách je v návrhovém

programu vytvořeno několik prokůvů kolem součástek, v tomto případě rezistorů, kteří reprezentují diody, včetně termálních plošek okolo pájecích ploch tzv. padů.



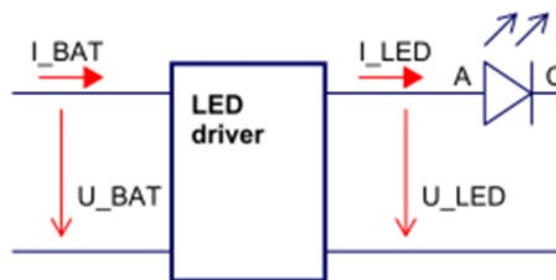
Obrázek 3: Umístění LED diody na DPS [24]



Obrázek 4: Termální plošky a prokůvy v návrhovém programu

S příchodem LED technologie vzniká nový problém s napájením, jelikož LED dioda vyžaduje konstantní zdroj proudu, je třeba zakomponovat do světlometu driver neboli budič pro LED diody (obr. 5). Tím vzniká další komponent světlometu, na který je třeba klást důraz. Účinnost LED diody se nedá příliš ovlivnit, pouze zaručením dobrého odvodu tepla pro prodloužení její životnosti a stálosti parametrů. Jedinou možností, kde zvýšit účinnost je již zmiňovaný driver, který napájí LED diody. LED drivery jsou ve většině případů navrhovány na desku plošného spoje vyrobeného z materiálu FR4.

V průmyslovém odvětví automobilových světlometů jsou na desku plošného spoje světlometu kladeny vysoké požadavky na spolehlivost a kvalitu, jelikož může jít o součást, která nepřímo ovlivňuje zdraví a bezpečnost osob. Při výrobě se klade důraz zejména na delší životnost světlometu, než je délka života samotného vozu. Je to dáno tím, že DPS dodávané do světlometů spadají v normách IPC do kategorie 3, kde je vyžadován nepřetržitý provoz zařízení bez poruchy. Do této kategorie patří zejména zařízení na podporu života nebo systémy pro leteckou kontrolu.



Obrázek 5: Blokové schéma budiče LED

Tato práce se zabývá právě kvalitou vývojových vzorků připravených pro interní účely firmy v laboratoři, kde bude vyhodnocována přesnost výroby prototypů LED driverů. Zároveň se zaměří na kvalitu desek dodaných od externích dodavatelů, kde se předpokládá preciznost výroby ve třídě 3. Pomocí stanovené metodiky budou porovnány dodané LED drivery a vyhodnoceny dodavatelé na základě určených parametrů.

2 Základní normy IPC pro DPS

IPC je zkratkou organizace The Institute of Printed Circuit (také známa pod označením „Asociace spojující elektronický průmysl“), která původně vznikla z iniciativy šesti výrobců DPS v USA. Postupně začala spolupracovat s dalšími organizacemi pro standardy jako je ANSI, původně pouze z USA postupem času i ze zahraničí. Dnes má IPC přes 2700 členů z 53 zemí, kteří zastupují firmy v aktivní výrobě, nebo také univerzity či jednotlivce. Postupem času IPC začala sbírat data od všech svých členských společností i dobrovolníků a na jejich základě vytváří standardy, příručky a požadavky. To sebou nese určité výhody, např. všichni členové mohou čerpat ze zkušeností velkých firem a nemusí opakovat velmi nákladné výzkumy. Tudíž všichni mají základní pilíř, na kterém mohou „stavět“. Jelikož existuje IPC dokumentace pro každou jednotlivou fázi vývoje od návrhu, přes výrobu a montáž až k testování a dokumentaci. [1] [2]

Jednou z hlavních výhod používání průmyslových standardů je stanovení základních podkladů. Zároveň vytvářejí minimální úroveň výroby, kterou by se všichni účastníci měli být schopni držet. Pro všechny bývá mnohem snazší se informovat o běžných požadavcích, než pracně vyvíjet velké množství požadavků různých individuálních společností. Na druhou stranu celý tento proces má svoji velkou nevýhodu. Průmyslové standardy jsou vytvářeny shodami a než se dosáhne určité shody, jsou standardy obvykle zastaralé, tudíž představují nejprostší nároky.

Mnoho společností se z různých důvodů musí pohybovat nad těmito standardy. Protože je jejich pojetí pokročilejší a přesahuje rozsah standardů, které mají v tu chvíli k dispozici. Nicméně pokud je možnost průmyslové standardy dodržet, i přes veškeré jejich nevýhody, předejde se mnoho závadám.

3 Hodnocení kvality neosazených DPS a použitá metodika dle IPC norem

Při hodnocení kvality neosazených DPS je stěžejní norma IPC-A-600 (Acceptability of Printed Wiring Boards). Tento dokument, popisuje cílové (objektivní), přípustné a nevyhovující podmínky, které jsou pozorovatelné buď interně, nebo externě na neosazených deskách plošného spoje. Dále také reprezentuje vizuální výklad minimálních požadavků popsanych v různých specifikacích.

Cílené podmínky (Target Condition) bývají v mnoha případech téměř dokonalým stavem. Nicméně dosažení tohoto stavu je ne vždy proveditelné, hlavně z technologického hlediska.

Přípustné podmínky (Acceptable Condition) popisují stav, kdy DPS nejsou zcela dokonalé, ale budou splňovat požadavky na spolehlivost v prostředí, kde má svoji funkci plnit. Tyto podmínky jsou splněny, pokud jsou přijatelné alespoň pro jednu ze tří tříd produktů, nikoli pro všechny třídy produktů současně.

Nevyhovující podmínky (Nonconforming Condition) popisují stav, kdy DPS nesplňují nároky na spolehlivost tam, kde mají plnit svoji funkci. Tento stav je neakceptovatelný alespoň pro jednu nebo více tříd produktů, ale může být přípustný pro jiné třídy.

Kritéria pro vyhodnocování kvality DPS jsou dělena do tří kategorií zvaných třídy. Prohlášením DPS jako třídy 1, 2 nebo 3 automaticky definuje minimální sady požadavků na přijatelnost produktu. [3]

Třída 1 - Základní elektronické produkty: zahrnuje spotřební produkty, některé počítače a počítačové periferie pro aplikace, kde se na vizuální (kosmetické) nedokonalosti neklade důraz. Hlavní požadavek je funkce.

Třída 2 - Pro elektronické produkty speciálních služeb: zahrnuje komunikační vybavení, pracoviště firemní zařízení a přístroje kde je požadován vysoký výkon a delší doba života a pro které je zamýšlen nepřerušovaný provoz, ale není kritický. Některé kosmetické nedokonalosti jsou povoleny.

Třída 3 - Elektronické produkty s vysokou spolehlivostí: zahrnuje vybavení a produkty, kde je nepřetržitý výkon nebo provoz na povel kritický. Odstávka vybavení nemůže být tolerována a zařízení musí fungovat, když je to požadováno. Patří sem zařízení pro podporu života nebo systém pro leteckou kontrolu. A zároveň této třídy patří právě DPS dodávané do automobilových světlometů. [2]

Aby mohla být vyhodnocena deska DPS a zároveň zařazena do určité třídy je nutné vzorek analyzovat, k tomu se používá např. metalografický výbrus a další testy.

3.1 Proces metalografického výbrusu pro vyhodnocování DPS

Proces metalografického výbrusu nebo také mikrovýbrusu je destruktivní metoda, která se používá k popisování vlastností materiálů, k analýze druhu závad a defektů dle uvedených norem IPC-A 600 a IPC-A-610, případně pro zobrazení vnitřní struktury desky nebo komponentu.

Proces metalografického výbrusu začíná přípravou vzorku. Hlavní oblastí zájmu bývají pájené plošky, také se často kontrolují prokovy mezi vrstvami či nanesené vrstvy pokovení. Jelikož jsou okolní části desky pro výbrus nezajímavé, většinou se odstraňují, proto se lze soustředit přímo na samotnou oblast zájmu. Ještě před samotným řezáním desky je nutné odstranit veškeré nečistoty. Po očištění a řezání se vzorek upevní do formy, v ní se zakonzervuje pryskyřicí. Poté se vzorek brousí, leští a opět čistí. Nakonec se zkoumá pod mikroskopem, kde se analyzují nálezy a vyhodnocují se.

Manuální techniku zhotovení mikrovýbrusu popisuje norma IPC-TM-650 2.1.1.1. Pro poloautomatickou a automatickou techniku procesu výbrusu je norma IPC-TM-650 2.1.1.2A Standard ASTM E 3 uvádí detaily pro výrobu vzorku. Problémy, které se můžou vyskytnout v jednotlivých krocích mikrovýbrusu jsou popsány v IPC-MS-810. [1] [4]

3.1.1 Dělení materiálů a zalévání vzorků pro mikrovýbrus

Při realizaci pozorování vzorku pomocí mikrovýbrusu, je nutné určit, jaká část vzorku materiálu bude pozorována. Při dělení vzorku je možnost výběru řezu dvěma směry. První dělení materiálu je příčné, kdy je orientace zrn kolmo na směr tváření. V tomto řezu jsou jasně viditelné jednotlivé vrstvy desky plošného spoje. Jedná se o nejvíce používaný řez pro analyzování materiálu mikrovýbrusem. Nevýhodou je mechanické a teplotní ovlivnění dané desky. Podélné dělení není tolik běžné, slouží zejména pro mapování textury povrchu. Orientace zrn je podélně na směr tváření. [5]

Možnosti dělení materiálu:

- 1) Mechanické – pásovou či kotoučovou pilou, rozbrušovací pilou za mokra.
- 2) Tepelné – plamenem, laserovým paprskem, elektroerosivní obrábění.

Tabulka 1: Srovnání metod dělení materiálu [5] (Časy a napadené oblasti jsou orientační.)

Metoda	Poškozená oblast [μm]	Čas [s]
Plazma	1,5	10
Laser	0,5	2,3
Elektro-erozivní	0,05	2400
Pásová pila	0,300	20
Rozbrušovací pila	0,015	28
Precizní rozbrušovací pila	0,005	300

- **Rozbrušovací kotoučová pila za mokra**

Dělení vzorku rozbrušovací pilou za mokra je nejvyužívanější proces při tvorbě mikrovýbrusu. Na vzorek je přiložen kotouč, který je posouván v ose X směrem ke vzorku. Na rozbrušovací kotouč dopadá kapalina, která kotouč chladí.

- **Vlivy na proces dělení materiálu**

Dělicí zařízení může být automatické nebo manuální. U automatického zařízení stanovený program udělá řez dle předvoleného programu. Výhoda automatického zařízení je v eliminaci lidského faktoru a chyby. Naopak u manuálního procesu nejsou třeba drahé zařízení, avšak jsou zde důležité parametry jako rychlost posuvu a síla motoru, které nejsou přesně řiditelné.

Chlazení bývá řešeno průtokem chladicí kapaliny pouze na řezací kotouč. Tento kotouč má také vliv na kvalitu a přesnost řezu, zejména vlastnosti matrice a abraziva kotouče. Měkkou matrici využíváme pro tvrdé materiály a naopak tvrdou matrici pro měkké materiály. Tvrdost matrice lze zjistit z názvu kotouče. Hustota abraziva se zvyšuje směrem k vnitřnímu průměru, což zajišťuje konstantní řezné vlastnosti při postupném opotřebení kotouče. Póry ve struktuře kotouče napomáhají k tvorbě třísky. Neubývající dělicí kotouče bývají většinou s kovovou nebo plastovou matricí s abrazivem v podobě diamantu. Důležitá je rychlost otáčení, aby řez nebyl třepený nebo spálený. Během samotného procesu může vznikat nově vytvrzená křehká vrstva způsobená agresivním dělením, zapříčiněná kalícím efektem chladicí kapaliny.

Při uchycení vzorku je stěžejní aplikovaná síla, aby nedocházelo k vibracím, nebo k poškození vzorku. Uchycení může být z jedné nebo z obou stran pomocí úchytových přípravků. Nejvíce se využívají úchytové čelisti s horizontálními upínacími. Čelisti mohou být prizmatické pro oválné tvary, pogumované pro citlivé povrchy, rýhované pro nerovné povrchy. Pokud je vzorek neforemný a upnutí je problematické, volíme zalití vzorku před samotným řezáním. Materiály, které se používají pro výrobu desky plošných spojů, mají rozdílné vlastnosti struktury, proto je nutné zvolit správný postup dělení vzorku, aby nedošlo k popraskání, delaminaci či odtržení povrchové vrstvy. Obecně platí, pro měkké materiály je nutný pomalý posun řezu. [5]

3.1.2 Zalévání vzorků

Vzorek zaléváme zejména, pokud má nepravidelné tvary, nebo v případě jsou-li vzorky malé a citlivé na manipulaci jako DPS desky. Fixací vzorku zabráníme poškození během přípravy a docílíme uchycení malých vzorků v preferované poloze. Při zalévání musí být odlitek standardizovaného tvaru, který definuje držák.

Požadavky na zalévací pryskyřici jsou nízká smrštivost k zabránění tvorby mezer, vytvrzení epoxidu bez tvorby bublin, vysoká přilnavost ke vzorku, nízká hustota, fyzikální vlastnosti podobné samotnému vzorku. Dále musí mít pryskyřice určitou tvrdost a dostatečnou průhlednost pro pozorování vzorku pod mikroskopem. Také se zkoumá její chemická odolnost, zdravotní a environmentální nezávadnost. Existují dva typy zalévání: za studena a za tepla a u obou platí pravidlo, že vzorek před zaléváním by měl být vysušený a odmaštěný. [5]

3.1.3 Zalévání za studena

K zalévání za studena se využívají povětšinou vícesložkové akrylátové a epoxidové pryskyřice. Tento proces je vhodný zejména pro vzorky citlivé na teplotu a tlak, jelikož zde nedochází k razantní změně teplot jako při zalévání za tepla. Přístrojové vybavení není nutností, avšak při větším množství vzorků je proces nákladný.

Akrylátová pryskyřice používaná k zalévání za studena se vyznačuje krátkou dobou tuhnutí, a dostatečnou viskozitou pro zatečení do formy. Využívá se zejména ke kontrole mikrostruktury, přiblížení makra svarů a jejich vyhodnocení.

Epoxidové pryskyřice jsou taktéž často využívány. Mezi jejich vlastnosti patří průhlednost, nízká smrštivost, nízká tvorba mezer, nízká teplotní zátěž, nízká viskozita a dlouhá doba tuhnutí. Využívanou epoxidovou pryskyřicí je např.: Epofix, Specifix- 20/40, Prontofox. [5]

3.1.4 Zalévání za tepla

U zalévání za tepla jsou nejčastěji používány jednosložkové akrylátové a epoxidové pryskyřice. Vzorek se umístí do zalévací formičky a zalije pryskyřicí. Ve formičce se za tlaku 35 MPa zahřívá na teplotu 180 °C, čímž se pryskyřice vytvrdí.

Technologie je vhodná zejména pro vzorky, které jsou odolné teplotě a tlaku, protože při těchto podmínkách mohou nastat deformace vzorku. Jsou zde kladeny požadavky na přístrojové vybavení, zejména lis. Při větším počtu vzorků je tato technologie levnější než zalévání za studena. Do epoxidu se mohou dát přísady, které vniknou do pozorovaných trhlin a tím se na mikroskopu trhlina zvýrazní. Vzhledem k tomu, že u zalévání je nutná vysoká teplota a vysoký tlak, v elektrotechnice se tato metoda tolik nevyužívá. [5]

3.1.5 Metalografická příprava

Hlavní cíl, kterého je potřeba dosáhnout v konečné fázi leštění je zviditelnění skutečné mikrostruktury desky plošného spoje. Mechanická příprava je nejběžnější metoda přípravy vzorku. Snahou je zviditelnit a zachovat všechny mikrostruktury vzorku, udržet povrch bez škrábanců a deformace. Výbrus by měl být dokonale rovinný.

Tabulka 2: Proces přípravy

Broušení	Rovinné broušení
	Jemné broušení
Leštění	Diamantové leštění
	Oxidové leštění

Broušení je proces mechanického odstraňování materiálu z povrchu vzorku. Cílem je rychlé odebrání materiálu, aby docházelo k co nejmenšímu poškození vzorku. Vhodně zvolené parametry přípravy pomůžou odstranit deformace z předchozí fáze procesu. Během rovinného broušení dochází k největšímu mechanickému poškození, kdy je většinou zvolený kotouč z hrubého zrna s plně fixovaným abrasivem. K broušení se používají převážně papíry nebo folie z karbidu křemíku SiC, popřípadě disky z oxidu hlinitého Al₂O₃ nebo diamantu. Výhodou diamantových disků je konstantní rychlost ubírání vzorku, dochází k postupnému odhalování dalších částic abraziva a to poskytuje dlouhou životnost disku, která bývá až 100x větší oproti SiC papíru. Zároveň u diamantového kotouče nedochází k zaoblování hran a výsledný povrch má vyšší rovinnost oproti papíru. Diamantové brusné disky jsou vhodné pro automatickou přípravu. Mezi výhody SiC papíru patří rychlost úběru materiálu na začátku broušení a podstatně přijatelnější cena. Platí pravidlo, že abrazivum by mělo být alespoň 2x tvrdší než materiál vzorku. Existují také povrchy bez abraziva, kam abrazivo přidáváme až během samotného procesu.

Během broušení se v důsledku tření generuje teplo. Příliš vysoká teplota může způsobit změny vlastností a mikrostruktury připravovaného materiálu, nebo posouvání plátna. Smáčedlo odvádí teplotu a nečistoty z brusného povrchu a zároveň plní mazací funkci. Nejčastěji používané smáčedlo je voda, která se využívá pro povrch s fixovaným abrasivem, případně smáčecí emulze pro povrchy, na které se abrazivo přidává během procesu broušení. Optimální volba množství smáčedla je závislá na ploše vzorku a typu povrchu. Povrch musí

být vlhký ale bez tekutiny. Příliš málo smáčedla způsobí přehřívání a zalešťování nečistot, naopak mnoho smáčedla zpomaluje efektivní broušení vzorku.

Pro samotné broušení je vzorek umístěn na unášec hlavy, který rotuje. Směr rotace záleží na okolnostech. Souběžná rotace hlavy a disku je nejvíce používána, efektivně odstraňuje smáčedlo se zbytky abraziva mimo povrch. Druhá možnost je protiběžná rotace hlavy oproti disku, která se používá, pokud je nutné rychlé odebrání materiálu. Zde je výhoda, že dodané abrazivo zůstává na kotouči a tím se zvyšuje efekt broušení. Přítlak je doporučován na standardní vzorek o průměru 30 mm při broušení do 40 N a při leštění do 30 N.

Častým problémem bývá kontaminace brusných nebo leštících kotoučů kvůli nedostatečnému čištění mezi jednotlivými kroky přípravy. Může to být způsobeno například pokládáním jednotlivých leštících plátů přes sebe nebo nedostatečným čištěním vzorků mezi jednotlivými kroky. Základem je si předem zvolit správný postup spočívající ve správné volbě dělicího kotouče, parametrů řezu, správnou zalévací hmotu a parametry zalévání. [5]

3.2 Vrtání, začištění otvorů

Dnešní konstrukce desek plošných spojů už dávno nejsou pouze jednovrstvé desky. Daleko častěji se používají vícevrstvé desky plošných spojů, které ale vyžadují vzájemné propojení jednotlivých vrstev. Z těchto důvodů se nejčastěji desky osazují prokovy. Na tyto otvory budou aplikovány technologické procesy chemického a galvanického nanášení kovů. K vytvoření samotného otvoru nelze použít žádnou technologii, která je založena na lisování, protože povrchy otvorů nejsou dostatečně hladké a mohou se na nich vytvořit mikrotrhliny. Pro vytvoření otvorů se mohou použít dvě velmi odlišné technologie, první je vrtání velmi tenkým vrtákem na frézce. Druhou méně používanou technologií je řezání laserem, jeho využití je malé z důvodu složitější logistiky a potřeby dvou strojů.

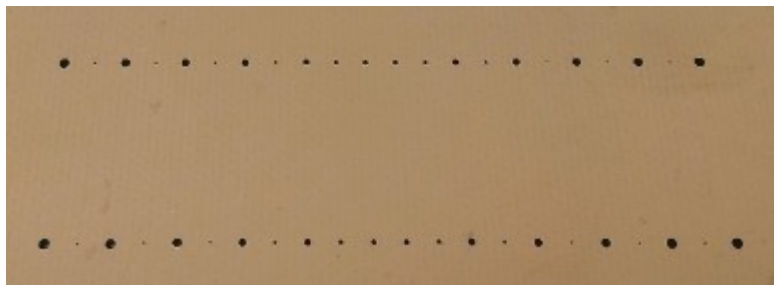
Norma, kterou se řídí vstupní materiál je IPC-4101D. Tato norma určuje tloušťku plátované mědi, její tolerance a je zde přiložený seznam se základními materiály pro výrobu desek. Obsahem normy jsou také pracovní teploty, pro které je daný materiál určen. [6]

Sledované parametry:

Mezi důležitá hlediska při vrtání patří materiál vrtáku, popřípadě jeho povlakování, otáčky a rychlost posuvu do místa řezu. Po samotném vrtání je nutné zkontrolovat jeho kvalitu. Kontroluje se vnitřní struktura otvoru, a také umístění děr na desce. Pro úspěšnost dalších technologických pokovovacích operací a tím celé výroby je důležitá kvalita vnitřního povrchu otvoru a jeho okrajů.

- Jakost stěny otvoru – je zkoumána buď destruktivně, nebo nedestruktivně. Destruktivně to probíhá tak, že podélnou osou otvoru je veden řez a pod mikroskopem je posuzován vzhled vnitřní stěny. Nedestruktivně se otvor zkoumá optickou prohlídkou. Jelikož má otvor poměrně velkou hloubku a malý průměr musí se používat speciálně konstruované objektivy a osvětlovací zařízení.
- Otřepy – jsou dalším parametrem zkoumání kvality otvoru. Musí se posoudit jejich velikost pod lupou s lineárním zvětšením několik jednotek až desítek. Vznik otřepů se dá účinně zabránit, když při vrtání řady děr je použita pomocná vrchní deska.
- Průměry a umístění otvorů – musí také projít kontrolou. Prvně se kontrolují správné průměry otvorů na optických promítacích zařízeních. Poté se kontroluje umístění děr na desce (obr. 6). Musí se změřit správná rozteč děr, která bývá od desetin milimetru

až po desítky centimetrů, a zároveň má ještě předepsanou toleranci s přesností na desítky mikrometru.

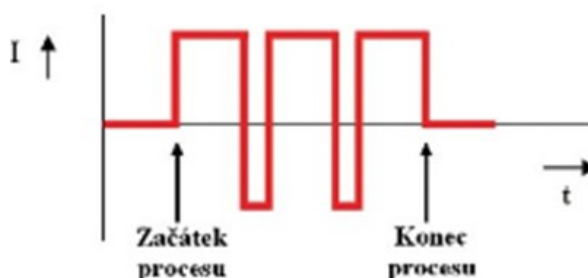


Obrázek 6: Testování procesu vrtání v plátované mědi [7]

- Spálení prepregu – jedná se o defekt, který nastává během vrtání. Otvor se může jevit hladce bez otřepů, ale vlákna jsou roztavená a při vyndávání vrtáku se může dostat nános roztavené struktury na okolní měď. To způsobí následné špatné propojení prokovu s okolní mědí.

3.3 Galvanické pokovení otvorů a cest

Následný proces, který probíhá po vyvrtání průchozích děr, je proces pokovování. Před pokovením se DPS odmastí a zbaví povrchových nečistot po vrtání ve dvou lázních. Tento krok se nesmí opomenout ani zanedbat, protože výrazně ovlivňuje úspěšnost provedení dalších kroků. Následujícím krokem je aktivace, tj. zvodivění povrchu materiálu roztokem na bázi uhlíku. Tento roztok se používá kvůli své dobré adhezi na základní materiál FR4, který tvoří povrch vyvrtaných děr. Používaný roztok má nízkou viskozitu (blíží se viskozitě vody), tudíž snadno proniká do malých otvorů. Posledním krokem je samotné pokovení, zde se používá metoda reverzního pulzního pokovování. Metoda je založena na změně polarity v daném časovém intervalu (obr. 7). Hlavní výhodou této metody je odebrání přebytečného materiálu, který se během procesu vytváří na hranách otvoru, díky tomuto jevu se vytvoří rovnoměrnější vrstvy mědi po celé ploše. [7]



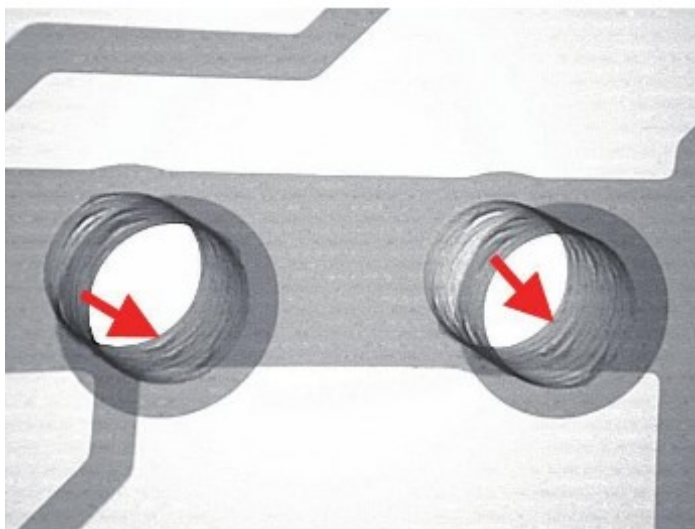
Obrázek 7: Princip metody reverzního pulzního pokovování [7]

Sledované parametry:

Kvalitou pokovení otvorů se zabývá norma IPC-A-600 v kapitole 2.5 Holes, kde je popisována pokovená plocha v % aby spadala do dané třídy. Aby prokovy vyhovovaly pro třídu 3, nesmí se v nich nacházet žádné voidy, třída 3 se uplatňuje v automobilovém průmyslu. Z tohoto důvodu se musí každý otvor a použítá technologie kontrolovat.

- Špatné pokovení – bývá relativně méně nebezpečnou vadou. Jelikož se při výstupní kontrole tato vada snadno odhalí do samotného výrobku se DPS s touto vadou vůbec nedostane.
- Vady způsobené vrtáním – vznikají při výrobě opotřebovaným vrtákem. Jelikož je nutné na výměnu opotřebovaného vrtáku zastavovat celou výrobu, výrobci často překračují životnost vrtáku. Dalším důvod pro překročení životnosti je vysoká cena vrtáku. Když

se otvor vyhotovuje opotřebovaným vrtákem, dochází k vysokému poklesu kvality vrtaného otvoru. Opotřebení vrtáku se prvně projeví otupením hlavního ostří vrtáku, později se mohou tvořit další vady na ostří. Všechny tyto vady mají za následek špatný povrch otvoru, hlavně dochází k potrhání vláken. Z hlediska technologie je otvor spíše protlačován než vrtán. Z tohoto důvodu je na povrchu otvoru zvýšená drsnost a nebývá dodržen ani tvar a velikost. Všechny tyto faktory vedou k vytvoření nehomogenního pokovení (obr. 8), tudíž se vytvoří místa se slabou vrstvou pokovení. Dalším problémem, který díky tomuto jevu nastává, je pronikání mědi hlouběji do DPS a zhoršují se elektrické vlastnosti. Bohužel se tyto vady projeví až po určité době provozu a jsou těžko odhalitelné. V místech s menší vrstvou pokovení dochází k praskání mědi (Barrel Crack), a tudíž dochází k přerušení vedení.



Obrázek 8: Rentgenový snímek nehomogenního pokovení otvorů [8]

- Praskliny – jsou další nebezpečnou vadou, která vzniká v otvorech kvůli chybné technologii. Jedná se o nedostatečné spojení vyloučené mědi v otvoru na vnitřní vrstvy. Praskliny jsou důsledkem tohoto nedostatečného spojení, zároveň dochází k přerušení vedení do vnitřních vrstev. Další praskliny mohou vznikat při tvorbě pokovení v otvoru, kde dochází k vysoké roztažnosti v ose Z, což bývá způsobeno nesprávnou volbou základního materiálu. Také mohou vznikat v důsledku nedodržení technologických předpisů při výrobě desek. [7]
- Delaminace – je stav, kdy se oddělí sousední vrstvy DPS. Hlavní příčinou je vlhkost v dutině základního materiálu. Vlivem nárůstu tepla působícího na DPS, se dutina začne rozpínat a tím způsobí separaci sousedních vrstev. Další příčinou je špatná volba základního materiálu, vzhledem k použité pájce. Základní materiál jako FR4 je hydrofobický a absorbuje vlhkost z atmosféry, proto je nutné DPS ihned po výrobě vakuově uzavřít. Delaminace vede k pnutí ose Z, a tedy k možnému utržení prokovů.
- Nedostatečná vrstva koloidu – který je nanášen v tenké vrstvě. Pokud se nanese příliš tenká vrstva, může to mít za následek špatné nanesení mědi. A tudíž vzniká nekvalitní propojení. Pokud se toto stane, dochází ke zvýšení odporu v daném místě, s tím narůstá i teplota při průchodu proudu a může dojít k přerušení spoje při jeho zatížení. [8]

3.4 Nepájivá maska

Nepájivá maska chrání odhalenou měď, a také slouží jako izolační povrchová vrstva. Nejpoužívanější barvy masky jsou zelená, modrá a červená. Ve světlometech se využívá také bílá nepájivá maska z důvodu reflexe, nebo černá pro splnutí DPS s okolními černými plasty.

Sledované parametry:

Norma, která se zabývá nepájivou maskou je IPC-SM-840. Akceptování následujících vad na deskách plošných spojů závisí na tom, jak jsou klasifikována zařízení, do kterých osazené desky plošných spojů vstupují. Klasifikace elektronických zařízení je definována v normě IPC-A-610. Dalším kritériem při vyhodnocení vady by měl být vliv na funkci sestavy. Nehomogenní povrch nepájivé masky může mít vliv na tvorbu můstků mezi sousedními vodiči nebo vytvářet nebezpečné elektrické podmínky na DPS. [2]

Základní požadavky při vytváření nepájivé masky:

- přilnavost,
 - zapouzdření povrchu,
 - tloušťka,
 - odolnost proti tepelnému rázu,
 - rovinnost.
- Blistering (puchýře) – je první vadou, která vzniká delaminací vrstvy základního laminovaného materiálu. Vada se projeví formou místního vydutí nebo oddělení jednotlivých vrstev. Tato vada se také může objevit mezi základním materiálem a nepájivou maskou popřípadě vodivou folií. Důvod vzniku puchýřů bývá špatná předúprava povrchu mědi a s tím spojená nízká přilnavost nepájivé masky. Při přípravě vzniknou na povrchu mědi oxidy, které nejdou vždy zcela odstranit. Další příčiny vzniku této vady mohou být nevhodné zpracování nebo nekvalitní materiál. [9]
 - Measling - (obr. 9) – jinak řečeno bodová či vláknová delaminace, je další skrytá vada. Jedná se o vnitřní vadu laminátu, která se projeví bílými skvrnami pod povrchem základního laminátu. Zde dochází k izolaci skleněných vláken tkaniny od pryskyřice. [9]



Obrázek 9: Vada Measling – výskyt bílých skvrn pod povrchem základního materiálu [9]

3.5 Povrchové úpravy

Povrchové úpravy slouží především jako ochrana plošného spoje před oxidací, zajišťují dobrou pájitelnost a zajišťují dlouhou dobu skladovatelnosti DPS. Výsledkem povrchové úpravy je vysoká spolehlivost pájeného spoje. Normy, které se zabývají jednotlivými povrchovými úpravami, jsou IPC-552, IPC-4553, IPC-4554, IPC-4556. [2] [21]

Sledované parametry:

U desek plošných spojů pro světlomety je nutné dodržet zejména rovinnost povrchu dané povrchové úpravy. Je to dáno tím, že LED diody vyžadují naprosto rovný povrch. Důležitá je také tloušťka vrstvy pro umístění diod. Zejména z těchto důvodů je nevhodný často používaný HAL, který má tloušťku vrstvy 2 – 30 μm a povrch není rovný. [21]

- Materiálová kompatibilita – hlavní požadavek je kladen na výbornou smáčivost povrchů a kompatibilitu s různými druhy tavidel. Zároveň je důležitá kompatibilita povrchových úprav s nepájivou maskou.
- Procesní kompatibilita – zde jsou základní požadavky na rovinnost povrchu, nízký teplotní stress DPS, schopnost vícenásobného tepelného cyklu, dlouhodobá skladovatelnost
- Environmentální kompatibilita – z hlediska životního prostředí se musí jednat o netoxickou povrchovou úpravu, aby byly splněny veškeré ekologické normy.

Nejčastěji používané druhy povrchových úprav:

- ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold) - imerzní nikl a zlato,
- OSP (Organic Solder Preservatives) - metoda nanášení organických inhibitorů,
- ImSn (Immersion Tin) - imersní cín,
- ImAg (Immersion silver) - imersní stříbro,
- HASL (Hot Air Solder Leveling) - technologie žárového nanesení pájky na motiv.

Tabulka 3: Srovnání druhů povrchových úprav [10] [11]

	OSP	HAL	ImSn	ImAg	ENIG
Vícenásobný teplotní cyklus	ne	ano	ano	ano	ano
Rovinnost povrchu	ano	ne	ano	ano	ano
Tloušťka vrstvy [μm]	0,5	2 - 30	0,9 - 1,1	0,15 - 0,3	3 - 5
Pro součástky s malou roztečí vývodů	ano	ne	ano	ano	ano
Teploty nad 65 °C	ne	ano	ne	ne	ano
Náklady	nízké	střední	nízké	střední	vysoké
Skladovatelnost [měsíc]	< 6	12	až 6	6 - 12	až 12
Odolnost proti korozi	střední	dobrá	dobrá	špatná	střední

4 Hodnocení kvality osazených DPS a použitá metodika dle IPC norem

Jelikož v pájecím procesu mohly vzniknout vlivy, které zapříčinily vznik různých menších či větších defektů, je potřeba výsledný pájený spoj testovat. Faktorů, které ovlivňují kvalitu výsledného spoje je mnoho, od výběrů základního materiálu, tavidla, pájecí slitiny, přes teplotní profil a typ pece až k použití ochranné atmosféry. Z těchto důvodů je nutné testovat kvalitu výsledného spoje.

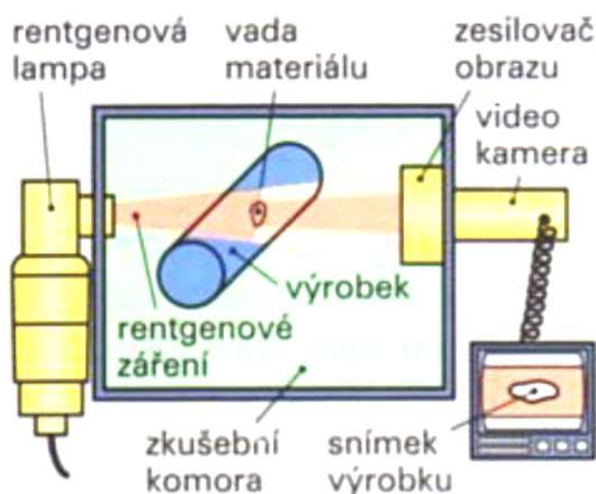
Testování lze dělit na tři části. První část je elektrická, kde se testuje funkčnost vodivého spojení. Druhá část je mechanická, kde se testuje pevnost v tahu, pevnost v tlaku apod. A poslední část je optické testování, které se dále dělí na destruktivní a nedestruktivní. Jelikož se při destruktivním testování znehodnotí výrobek, využívá se při optimalizaci výrobního procesu, hlavně se zjišťuje vnitřní struktura výsledného spoje. Při nedestruktivním testování se výrobek neznehodnotí a může se rychle a jednoduše zkontrolovat kvalita u každého kusu. Aby byla DPS efektivně vyhodnocena, využívají se k tomuto účelu vhodné normy. [3]

Norma IPC A - 610 patří mezi nejžádanější v problematice montáže elektronických sestav. Zabývá se montáží komponentů a jejich upevňováním. Rozebírá spojovacími materiály a techniky, jako je například vedení drátů, zajištění svazků, montáží upevňovacího prvku konektoru. Dále jsou zde zahrnuta kritéria přijatelnosti pro pájené spoje, terminálová propojení a nýtované spoje. Tato norma také popisuje další důležité technologie např. technologie průchozích otvorů, sestavy povrchové montáže, přichycování součástek lepením, SMT vývody a spoje. Samotná norma je rozdělena do několika kapitol. Pomocí vzorových obrázků a ilustrací ukazuje názorně všechna kritéria přijatelnosti elektrotechnických sestav. Znalost normy potřebují zejména lidé, kteří vyhodnocují kvalitu vyrobené a osazené DPS, norma je směrodatná pro pracovníky nákupu a prodeje. Každé dva roky vychází nová revize, nyní je revize G. K této normě je možné si dodělat školení, které je platné 2 roky. [2]

4.1 Rentgenová kontrola pro vyhodnocování spojů

Rentgenová kontrola je nejvyšším stupněm kontroly v elektronice. Jedná se o nedestruktivní zkoušku a prochází jím každý výrobek, na který jsou kladeny vysoké nároky. Nedestruktivní zkoušky nepoškozují testované díly a zároveň hledají vady (defekty) celistvosti a homogenity materiálu.

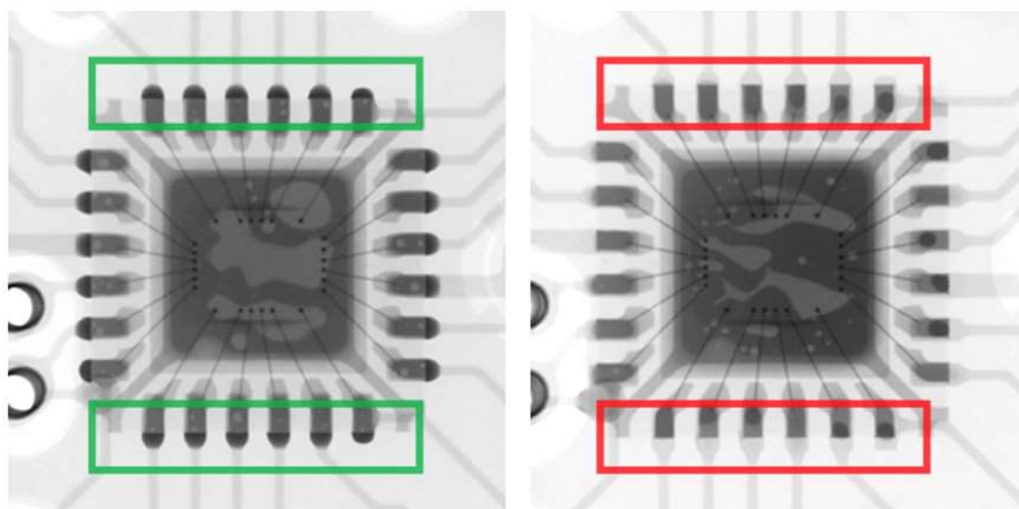
Při zkoušení rentgenovým zářením je kontrolován díl prozařován rentgenovým zářením, rentgenový snímek je zesílen a převeden na optický snímek zpracovatelný televizním řetězcem s videokamerou a monitorem (obr. 10). Vady materiálu se na snímku zobrazí jako světlejší místa (jedná se o dutiny).



Obrázek 10: Rentgenová kontrola [12]

Rentgenovým prozářením je možné kontrolovat ocel do tloušťky 80 mm a hliník do tloušťky 400 mm. [12]

V elektronice se rentgeny využívají pro kontrolu pájení součástek. Technologická náročnost pájení se s příchodem pouzder razantně zvýšila. Nejčastější chyby se dějí při osazování BGA, LGA či QFN součástek, kde navíc není možná optická kontrola správného osazení. Trend BGA je na vzestupu a doposud není efektivnější metoda, jak kontrolovat kvalitu osazení součástky.



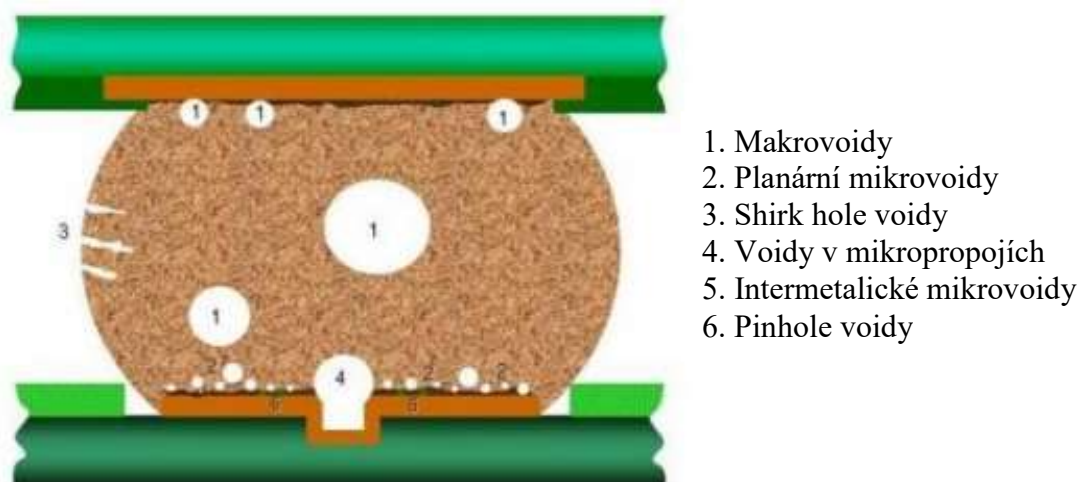
Dostatek pájecí pasty

Nedostatek pájecí pasty

Obrázek 11: Rentgenová kontrola QFN pouzdra

Pomocí rentgenu lze kontrolovat kuličky na BGA spoje QFN, QFP, pozici součástek i finální kompletaci produktů (obr. 11).

Bez kontroly mohou vznikat například nechtěné spoje mezi jednotlivými kuličkami u BGA, což při testování může zničit celou součástku. S rentgenem je možnost tomuto problému předejít a chybné osazení po jeho zjištění ještě opravit. Názorný obrázek demonstruje polohu a přibližnou velikost všech zmíněných typů dutin (obr. 12). Dokument IEC 62137-4:2014 se věnuje zkoušení spolehlivosti SMT montáže pouzder BGA a LGA i pouzder s vývody po obvodu SON a QFN.



Obrázek 12: Voids v BGA spoji [9]

Sledované jevy:

- Zkratky nebo můstky – jedná se o defekty mezi jednotlivými vývody. Většinou ke zkratům dochází ve fázi technologického procesu, kdy se nanáší tavidlo nebo pájecí pasta, pokud se stane, že tavidlo chybí nebo pájecí pasta naopak přebývá. Dalším důvodem jeho vzniku je příliš vysoká teplota pájení. Zde dochází k přehřívání plošek a rozprašování pájky. Vzhledem k minimální vzdálenosti mezi vývody BGA může dojít k jejich propojení. Ale tuto závadu lze snadno odhalit pomocí rentgenu, kdy pájka způsobí výrazně tmavší místa na snímku. Tento problém lze pozorovat i u jiných součástek (hlavně miniaturních tranzistorů), protože jejich vývody jsou velmi blízko u sebe a tudíž se snadno propojí. Zkrat je nejjednodušji odhalitelný pomocí rentgenu. [13]
- Bublinky (voidy) – vznikají ve spojích kvůli přítomnosti vzduchu, tavidla v pájkových vývodech pouzder nebo nečistot. Také se mohou objevit kvůli nedostatečnému přetavení nebo nadměrnému množství tavidla, takže se tavidlo zcela neodpaří a probublá do pájky. Při procesu pájení se tavidlo přeměňuje na plyn, ten uvázne uvnitř pájecí slitiny. Výskyt bublinek nemusí znamenat nefunkčnost vytvořeného spoje. Velmi často bývá ukazatelem nevhodného technologického postupu či procesu pájení. Bublinky se mohou objevovat buď přímo ve středu pákové kuličky, nebo na rozhraní substrátu pouzdra a vývodu nebo také na rozhraní vývodu a DPS. Bublinky ve spoji lze dohledat rentgenem, kdy budou na snímku tvořit světlejší místa. Čím je světlejší místo uvnitř, tím je void v kuličce větší. Pokud jsou voidy nad 40 % považují se za chybný spoj a musí dojít k opravě. Pokud se jedná o čipy pracující na vysokých frekvencích, nesmí voidy překročit 20 % jinak způsobují komplikace. [13]
- Usazení součástek – lze také kontrolovat pomocí rentgenu. Při použití citlivého rentgenu lze rozpoznat pájecí plošku i vývody a pro lze posoudit, zda má součástka správnou pozici.

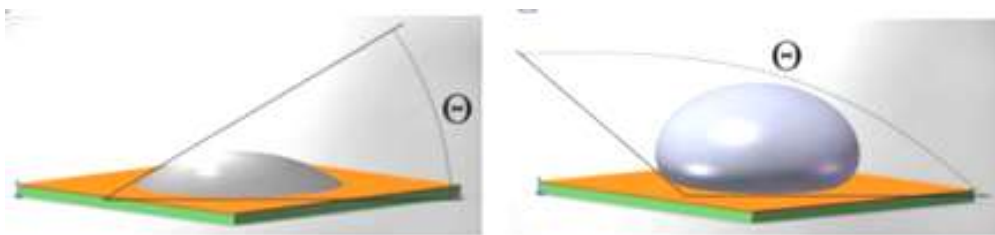
4.2 Smáčivost, pájení

Smáčivost plochy je vlastnost vyjadřující schopnost vytvořit na jejím povrchu při styku s roztavenou pájkou souvislou vrstvu pájecího materiálu. Pájka musí mít při pájení dobrou vzlínavost a přilnavost, aby se po celém povrchu pájeného materiálu vytvořila tenká a souvislá vrstva. [14]

Pro hodnocení smáčivosti povrchu roztavenou pájkou jsou důležité dva hlavní faktory:

1. Stupeň smáčivosti, který udává jak daleko se pájka po povrchu rozteče.
2. Rychlost smáčení, což je rychlost roztavení a roztečení pájky. Závisí na účinnosti použitého zdroje tepla, typu použitého tavidla a na probíhajících chemických reakcích.

Smáčivost je ovlivňována kromě typu smáčeného materiálu celou řadou dalších faktorů, jako je například složení pájecí slitiny a obsah nečistot v ní obsažených, drsnost pájených povrchů, stupeň oxidace pájených ploch apod.



Obrázek 13: Definice smáčecího úhlu [14]

Definice smáčecího úhlu je znázorněn na obrázku č. 13. V tabulce č. 4 je znázorněna závislost klasifikace pájitelnosti v závislosti na smáčecím úhlu.

Tabulka 4: Závislost smáčecího úhlu na hájitelnosti [14]

Velikost úhlu smáčení	Klasifikace pájitelnosti
$0^\circ < \Theta \leq 20^\circ$	Výborné až dokonalé smáčení
$20^\circ < \Theta \leq 40^\circ$	Dobré až velmi dobré smáčení
$40^\circ < \Theta \leq 55^\circ$	Postačující smáčení
$55^\circ < \Theta \leq 90^\circ$	Špatné smáčení
$0^\circ < \Theta \leq 20^\circ$	Nesmáčivost

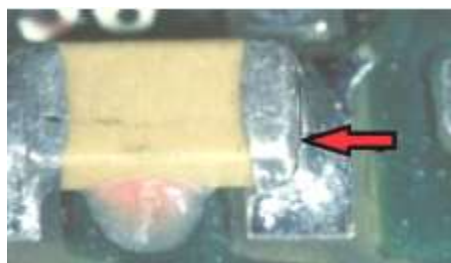
Pro vytvoření spolehlivého pájivého spoje je nezbytné dosáhnout dobré smáčivosti jak na součástce, tak na kontaktní ploše.

Pomocí mikrovýbrusu lze sledovat smáčecí úhly a vyhodnotit je na mikroskopu.

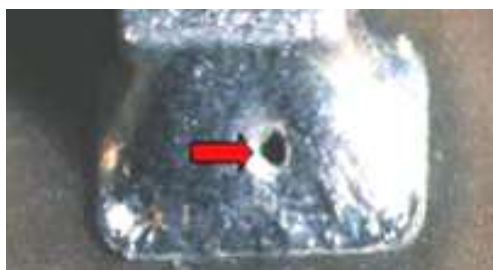
Příklady defektů a poruch [2] [22]:



tombstoning (náhrobní kámen)



cracked solder (prasklina)



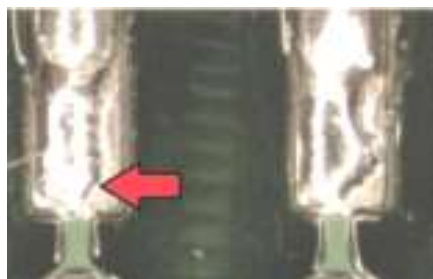
voids (dutiny)



incomplete reflow of solder paste
(nepřetavení pájecí pasty)



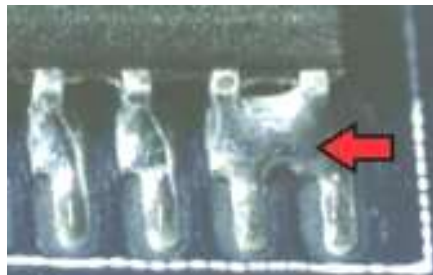
nonweting (nesmáčení)



deweting (odsmáčení)



beadings (kuličky pájky)



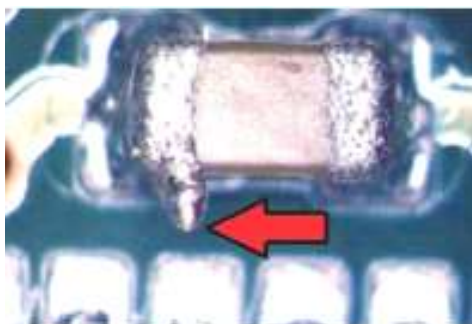
bridging (můstky / zkratky)



solder webbing/splashes (pavučiny)



disturbed solder (narušení pájky)



whiskery (krápníky)



hot tear/shrink hole (termotrhlina)

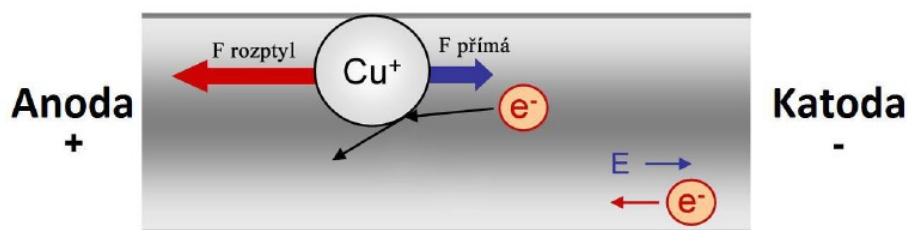
4.3 Elektromigrace kovu

Elektromigrace je přenos hybnosti elektronů vodiče na ionty, které následně tvoří propojovací mřížku materiálu, pokud je vodič pod vlivem elektrického pole. Jelikož elektromigrace může vzniknout u všech vodičů, je nutné počítat s vlivem elektrického proudu na elektromigraci iontů vodiče. Na elektrony, které proudí kovovým vodičem, působí poruchy mřížky vodiče a dochází k elektronovému rozptylu. Rozptyl vzniká, jakmile je jakýkoliv atom mimo své místo v krystalické mřížce. Vzájemné působení elektronů s atomy mřížky způsobí rozvibrování elektronů, čímž je produkováno teplo a následně narůstá odpor vodiče. Jakmile dochází ke zvyšování teploty vodiče, zvětšuje se počet atomů mimo své polohy v krystalické mřížce, opět se zvýší počet vibrací a znovu narůstá teplota. Aby tento děj vznikl, je potřeba velký tok elektronů a velký elektronový rozptyl. [15][16]

Elektromigrace může způsobit několik druhů poruch či vad. Nejvýznamnější vliv mají u tenkých vodivých cest. Prvním z defektů je tzv. díra, která vzniká po celé délce vodivé cesty. Dalším defektem je difuzní posun, u něhož může dojít k odpojení kontaktu, protože se většina části vodivé cesty přesunula na jiné místo. Obě poruchy jsou velmi závislé na mikrostruktuře vodivé cesty. Jejich vzniku se lze částečně někdy i úplně zabránit pomocí změn v metalurgickém procesu. [15][16]

4.3.1 Síly ovlivňující pohyb iontů

Na pohyb iontů působí dvě rozdílné síly (obr. 14). První je přímá síla, která přímo působí z vnějšího elektrického pole na nabité ionty kovu. Druhou je síla rozptylu, která způsobí rozptyl vodivých elektronů kovu. [15]



Obrázek 14: Síly ovlivňující pohyb iontů [18]

4.3.2 Rozdělení elektromigrace

Elektromigrace se rozděluje na dva základní druhy. Prvním je elektrolytická neboli iontová elektromigrace, která vzniká za teplot okolí menších jak 100 °C a při proudové hustotě do 1 mAcm⁻². Druhou je suchá elektromigrace, která vzniká za teplot okolí vyšších jak 150 °C a při vysoké proudové hustotě nad 10⁴ Acm⁻².

- **Elektrolytická migrace**

Jedná se o elektrochemický jev, který vzniká i za pokojových podmínek. Pokud je okolní teplota a proudová hustota tak nízká, že může být na povrchu přítomna voda.[15][19]

Průběh elektromigrace je rozdělen do tří kroků:

- 1) Rozpouštění – dochází k ionizaci stříbra a zároveň ionizuje voda z okolní vlhkosti za přítomnosti elektrického potenciálu. [19]

- 2) Transport iontů – vodíkový iont se přemísťuje ke katodě, kde se redukuje a tím se uvolňuje jako plynný vodík. Zároveň s tímto procesem se hydroxilový iont pohybuje směrem k anodě a reaguje se stříbrem, které se pohybuje od anody. Vzniká koloidní srážka blízko anody a vznikne hydroxid stříbrný. [19]
- 3) Depozice – nestabilní hydroxid stříbrný se rozkládá na anodě a tvoří oxid stříbrný v okolí anody. [19]

Mechanismus elektrolytické migrace je závislý na vodě a má tendenci vyskytnout se vždy, když je na izolátoru dostatek velké povrchové vlhkosti. Jelikož vlhkost umožňuje elektrolytické vedení proudu při použitém elektrickém potenciálu. Většinou se tento jev vyskytuje u stejnosměrného proudu. Pokud se použije běžný střídavý proud, dochází k minimální elektromigraci. Při vysokých frekvencích žádná elektromigrace přítomna není. Teoreticky se elektromigrace týká velké části kovových materiálů, ale pouze stříbro a částečně měď a cín se poddají jejím účinkům ve vlhkém prostředí. Ostatní náchylné kovy potřebují viditelnou vrstvu vody, aby došlo k elektrolytické migraci za pokojové teploty. Z toho vyplývá rozdělení elektrolytické migrace v závislosti na vlhkosti povrchu. První je stříbrná elektromigrace, čili stav s neviditelnou vrstvou vlhkosti povrchu. Druhá je mokrá elektromigrace, neboli stav s viditelnou vrstvou vlhkosti na povrchu. [15][19]

○ **Vlhká elektromigrace**

V jednoduchém případě se na stříbrném vodiči s kladným potenciálem (anoda) začne tvořit oxid. V něm začnou vznikat kladně nabité ionty, ty se přesouvají po vlhkých místech v ploše izolantu nebo přímo samotným izolantem k zápornému vodiči (katodě), celý proces se děje pod vlivem elektrického pole. Na záporném vodiči se ionty zachytí opět ve formě stříbra. Pokud by se putující ionty rozmístili rovnoměrně, nedošlo by ke změně elektrické funkčnosti obvodu, protože by přenos iontů byl velmi malý. Tudíž by nedošlo ke změně velikosti mezer mezi kontakty nebo vodivými cestami. V praxi se objevují dva různé elektromigrační mechanismy, které zapříčiní poškození elektrické funkčnosti obvodu. První z nich je nárůst koloidních částic a druhý je dendritické přemostění. Pokud dojde k přemostění dendritem nebo koloidními částicemi nastane v prvotní chvíli náhlý pokles odporu. Na začátku bude pokles malý, jelikož je i malá plocha dendritu. Jakmile se začnou tvořit další dendrity a společně budou zesilovat, dojde k dalšímu rychlejšímu poklesu odporu, ten bude dostačující pro vznik elektrického zkratu. [15]

○ **Mokrá elektromigrace**

Mokrá elektromigrace vzniká za působení vlhkosti v podobě kapek vody. Tudíž pokud se kapka objeví mezi vodiči, dochází k zesílení a zrychlení elektromigrace o několik řádů. Bylo dokázáno, že při přítomnosti kapky vody v mezeře mezi dvěma vodiči došlo při pokojové teplotě k zárodku dendritu do minuty a k přemostění dendritem do několika minut. Bez přítomnosti kapky vody v mezeře trval proces elektromigrace při 45 °C a 90 % vlhkostí skoro týden. Přemostění dendritem mezi anodou a katodou lze při těchto podmínkách pozorovat u různých materiálů např. zlata, mědi, cínu a niklu. Zatímco u kovových materiálů s ochranným oxidem k tomuto defektu nedocházím, může to být např. hliník, chrom a wolfram. Ve velkém množství případů se tento problém objevuje u hybridních obvodů, integrovaných obvodů, v podstatě u různých obvodů s malými mezerami mezi vodiči. Vady většinou bývají způsobeny zkondenzovanou vlhkostí popřípadě i přítomností chloridů. [15]

- **Suchá elektromigrace**

Jedná se o pohyb látky vlivem velké proudové hustoty v suchém prostředí. Elektromigrace v tomto prostředí vzniká pomocí síly elektronů, které dopadají na atomy kovu. Jelikož má vodič nehomogenní strukturu, nelze dosáhnout rovnoměrného atomového toku, tudíž dochází k přesunu materiálu a hromadění na různých místech. Když se začne materiál přesouvat, začínají vznikat díry, které mohou vést k úplnému rozpojení obvodu. Další defekt může vzniknout kvůli akumulaci materiálu, která zapříčiní vznik a hromadění pahorků, to má za následek korozi, zkrat či narušení ochranného oxidu. Oba tyto defekty úzce souvisí s rozdílem teplot na částech materiálů. Hrbolky se objevují na místech s nižší teplotou, než je průměr. Mechanismus suché elektromigrace je odlišný, hlavně co se týče podmínek, od elektromigrace elektrolytické. Jak název napovídá tato elektromigrace vzniká v suchém prostředí, navíc s teplotou nad 150 °C, ale především musí být proudová hustota vyšší jak 10^4 Acm^{-2} . Tyto podmínky a následně suchá elektromigrace se může objevit u integrovaných a tenkovrstvých obvodů. Většinou se objeví chyba na makroskopické úrovni a může vyřadit celou desku. Nicméně jelikož v těchto podmínkách není přítomna vlhkost zabrání se vzniku elektrolytické elektromigrace, která dokáže způsobit problémy daleko snadněji a rychleji. [15]

4.3.3 Mechanismy defektů vznikajících elektromigrací

Jsou známy tři rozdílné mechanismy pro vznik defektů. Jedná se o mechanismy difúzní, teplotní a vyrovnání koncentrace atomů. [16]

- **Difúzní mechanismus**

Zatímco uvnitř struktury vodiče skoro vůbec nedochází k přenosu hybnosti elektronů na ionty, na povrchu a na hranách materiálu k tomuto jevu dochází velmi často a s větší intenzitou, jelikož ionty jsou v krystalické mřížce na povrchu slaběji uchycené. Jakmile proud, který vodičem prochází, dosáhne určité síly, začnou se uvolňovat ionty z povrchu vodiče. Ty se pohybují ve směru proudění elektronů na povrchu vodiče. Částečně je i směr pohybu iontů ovlivněn i povrchovou strukturou mřížky. [16][17]

- **Teplotní mechanismus**

Pokud by byly atomy uspořádány dokonale v krystalické mřížce, což může být v ideálním vodiči, nebude docházet ke srážkám průchozích elektronů a tudíž ani k elektromigraci. Nicméně v reálném vodiči toto neplatí. Sice zde dochází ke srážkám proudících elektronů s atomy v místě poruch krystalické mřížky i s náhodnými atomy, které jsou rozvířované vlivem vyšší teploty. Nicméně energie těchto kolidujících atomů není dostatečně silná, aby mohlo dojít k uvolnění atomů z mřížky. Ale ve vývoji elektrotechniky se stále míří k výrobě a zapojení s co nejmenšími cestami. Pokud bude vodič tenký a průchozí proud vysoký začne velmi často docházet ke srážkám průchozích elektronů a tím i k uvolňování atomů z krystalické mřížky. Čím častěji bude docházet ke srážkám, tím víc se bude zvětšovat elektrický odpor vodiče a dojde k nárůstu teploty. Jelikož rostoucí teplota zapříčiní další rozvířování atomů, opět vzroste elektrický odpor a znovu vzroste teplota. Díky tomuto efektu může dojít až k přerušení vodivé cesty. [16][17]

- **Vyrovnání koncentrace atomů**

Ve chvíli, kdy se zastaví tok proudu vodičem, dojde k částečnému vyrovnání koncentrace atomů vodiče. To je zapříčiněno vlivem koncentračního spádu a nerovnoměrnému zahřátí vodiče. V podstatě dojde k návratu určité části přesunutých atomů zpět směr k jejich původnímu pístu na energeticky výhodnější místa. [16][17]

4.3.4 Důsledky elektromigrace v praxi

- **Whiskery**

Elektricky vodivé krystaly neboli tzv. „Whiskery“ rostou na povrchu některých kovů. Jejich výskyt ohrožuje správné fungování přístroje, protože svým růstem mohou propojit vodivé cesty a vytvořit zkrat. Vznik těchto krystalů je ovlivněn mnoha faktory, mezi které se řadí tlakové namáhání spoje, krystalická struktura pájecí slitiny, přítomnost intermetalické sloučeniny, teplota a vlhkost. Velikost whiskerů se pohybuje většinou od 1 μm do 10 μm , avšak mohou dosahovat mnohem větších rozměrů. Pokud dosahují do 10 μm , nejsou v automobilovém průmyslu podstatné a splňují předepsanou normu. Norma, která popisuje testování whiskerů se nazývá Jedec standard JESD22A121. Pro jejich pozorování je třeba mít dostatečné vybavení. Je doporučován optický mikroskop se zvětšením 300x pro pozorování 10 μm whiskerů, nebo elektronový mikroskop se zvětšením minimálně 250x. Pro účely testování jsou nastaveny dlouhodobé testy v řádu měsíců DPS v aktivním stavu, které se v automobilovém průmyslu pro tento účel neprovádí. [15]

- **Dendrity**

Růst dendritů vzniká pouze za určitých podmínek mezi místy, kde se nachází rozdílný elektrický potenciál na DPS a je zapříčiněn elektrochemickou migrací. Na začátku procesu dochází ke snížení povrchového odporu, to usnadní přesun iontů mezi elektrickými potenciály. Příčina samotného vzniku bývá kombinace zkondenzované vlhkosti a tavidlových zbytků na DPS. Samotné ionty, které v desce migrují, začnou utvářet stromovité struktury. Jejich růst je pro výrobu krajně nežádoucí, jelikož bývají příčinou nepředpokládaných úbytků napětí nebo i zkratů. [15]

Velmi často jsou whiskery zaměňovány s dendrity, ale ty jsou tvořeny elektrochemickými procesy. Jedná se o dva naprosto odlišné jevy. V případě whiskerů se jedná o tvar tenkého jednotlivého vlákna či vousu, který narůstá ve směru osy Z ven z povrchu. Dendrity se vyskytují v podobě stromovité struktury či připomínají sněhovou vločku, což znamená, že mají větvící se strukturu. Navíc dendrity rostou pouze podél povrchu a nepředstavují takové nebezpečí. [15]

4.4 Odolnost vůči environmentálním vlivům

Pro simulaci různých klimatických podmínek se používá speciální zařízení zvané klimatická komora. Toto zařízení souží k testování výrobků či jejich částí v různých klimatických podmínkách, kde se mění teplota či vlhkost. Zkoušením se ověřuje kvalita a odolnost součástek a materiálů při provozu či skladování. V praktické části této práce se klimatické komory využívají k testování defektů na DPS, nicméně DPS se netestují v aktivním stavu a tudíž nelze vyhodnotit vznik a defekty vyvolané elektromigrací kovů.

Klimatické komory lze rozdělit podle účelu použití:

- klimatický stres,
- klimatický šok,
- klimatická stabilita,
- klima v kombinaci s vibracemi,
- klima v kombinaci se slunečním zářením.

Se způsobem použití souvisí základní parametry klimatické komory:

- rozměr a objem testovacího prostoru (prostor pro umístění testovaného vzorku),
- rozsah nastavitelných parametrů,
- teplotní a vlhkostní rychlost změny.

4.4.1 Popis klimatické komory VCS 4080-10

V testovací laboratoři je k dispozici dostatečné množství klimatických komor. Všechny komory jsou modely vodou chlazené (dodavatel Vötsch), liší se v parametrech chladicího výkonu 5 °C/min, 10 °C/min, 15 °C/min a vnitřního objemu komory. Pro pozorování byla vybrána klimatická komora VSC 4080-10 (obr. 15) s následujícími technickými parametry.

Tabulka 5: Technické parametry klimatické komory VCS 4080-10

Vnitřní objem	0,8 m ³
Teplotní rozsah	- 40 °C až +180 °C
Vlhkostní rozsah	10 % až 100 %
Průtok chladicí vody komory	2100 l/h při teplotě vody 18 °C 4200 l/h při teplotě vody 18 °C
Potřebný tlak kapaliny	0,3 až 0,6 MPa
Teplota vody	+12 °C až +28 °C

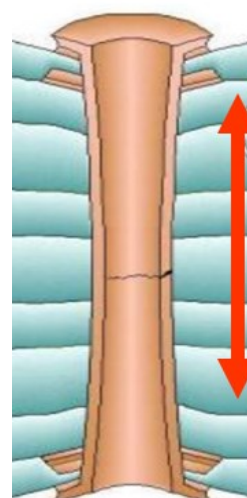


Obrázek 15: Klimatická komora VSC 4080-10 [25]

V komoře dochází k několikanásobnému opakování cyklu vysokoteplotního a nízkoteplotního režimu, z toho se určí, zda takové namáhání vyvolá u desek poruchu. Poté se u poruch analyzuje příčina. Většina běžných testů se u elektroniky do automobilů dělá řádově v rozsahu -40 až 105 °C. Dělají se testy aktivní i pasivní, kdy je elektronika funkční pod napětím, nebo pasivní, kdy je bez napětí. Délka testů je různá, liší se vždy požadavky zákazníka, běžně se pohybuje mezi 3 až 30 dny. Norma, která stanovuje jednotlivé testy ISO 16750.

Největší problém při testování je roztažnost v ose Z. Vícevrstvé desky se skládají z prokovů, které jsou stěžejní pro funkčnost desky. Vzhledem k vysoké teplotě začne struktura desky pracovat, prepregy se mohou nafukovat a tím dochází k praskání prokovů (obr. 16). Dále se občas stává praskání kondenzátorů při roztažnosti desky v X a Y ose.

Norma, kterou se řídí vstupní materiál je IPC-4101D. Tato norma určuje tloušťku plátované mědi, její tolerance a je zde přiložený seznam se základními materiály pro výrobu desek. Obsahem této normy jsou také pracovní teploty, pro které je daný materiál určen. Díky těmto datům může návrhář předem určit, zda daný základní materiál bude vhodný pro danou aplikaci.



Obrázek 16: Deformace prokovu v ose Z [2]

4.5 Termokamera

Termokamera je přístroj, který slouží pro získání teploty daného objektu bezdotykovou metodou. Princip bezdotykového měření teploty je založen na skutečnosti, že všechny předměty, které mají vyšší teplotu jak 0 K, tudíž mají teplotu nad hranicí absolutní nuly, vyzařují elektromagnetické záření. Pokud teplota v materiálu klesne na bod absolutní nuly, částice v materiálu přestanou kmitat a tím nebude možné vyzařovat energii do okolí. Tudíž ani nebude možné termokamerou snímat teplotu toho materiálu. [20]

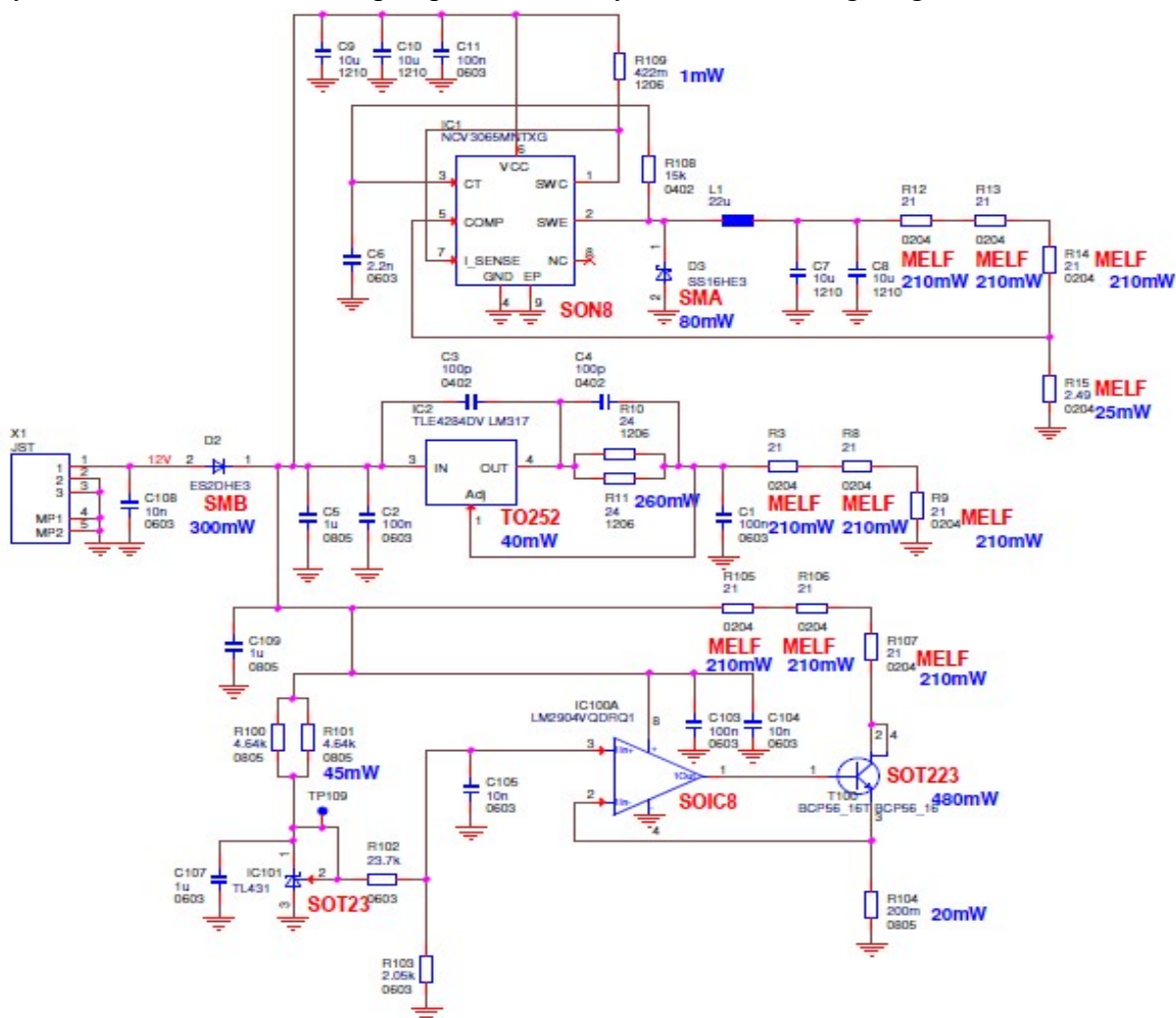
Stavba termokamery je velice podobná stavbě běžného fotoaparátu či kamery. Termokamera se skládá ze tří zásadních částí: optiky, detektoru a elektroniky pro zpracování a vytvoření obrazu. Optika bývá většinou vyrobena z germánia a funguje na stejném principu jako skleněná čočka. Její hlavní funkcí je filtrování potřebných vlnových délek. Do optiky je přiváděno elektromagnetické záření o všech vlnových délkách, nicméně čočka propustí dále pouze požadovanou vlnovou délku. Detektor převádí infračervené záření na elektrický signál, ale jeho úkolem není samotný převod na snímek. Detektory mohou pracovat na dvou různých principech a to tepelném nebo fotonovém. Tepelný detektor pracuje na principu změn elektrických vlastností, které jsou závislé na velikosti infračerveného záření, které je přiváděno na čočku termokamery. Zatímco fotonový detektor funguje na principu počítání fotonů. Tento detektor je daleko citlivější, má vyšší nároky na chlazení, tím se i zvyšuje hmotnost termokamery. Fotonový detektor má také specifickou spektrální citlivost, právě proto jsou detektory úzkopásmové a snímají pouze určitý úzký rozsah vlnových délek. Poslední částí je elektronika pro zpracování a vytvoření obrazu, která funguje podle použitého detektoru, jelikož ten převádí infračervené záření na elektrický signál. Tento převod se odehrává v závislosti na velikosti elektrického odporu, který je závislý i na teplotě. Dalšími elektrickými obvody se převod transformuje na elektrický signál. Poté přichází na řadu mikroprocesor, který zpracuje signál a automaticky kalibruje a vytvoří korekci obrazu, poté již může vzniknout finální obraz snímaného objektu. [20]

5 Praktická část

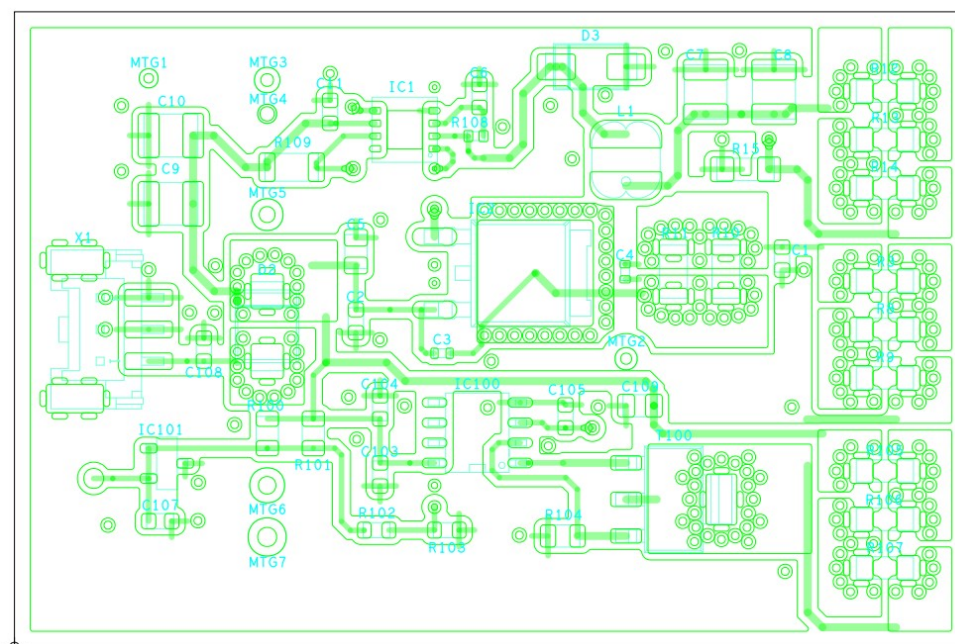
V praktické části došlo k navržení a porovnání několika vzorků DPS. Schéma bylo navrženo tak, aby zde bylo zakomponováno co nejvíce různých prvků a pouzder, které se využívají v praxi u desek plošných spojů určených ke světlometům v automobilovém průmyslu. Deska plošných spojů byla objednána od několika různých výrobců a následně proběhne její porovnání. Dále byla využita interní laboratoř pro potřeby vývojového oddělení, kde bylo vyrobeno několik zkušebních desek, pomocí kterých budou stanoveny limity a odchylky technologie ve firmě. Interní vzorky budou následně porovnány se vzorky dodanými.

5.1 Návrh vzorků pro testování

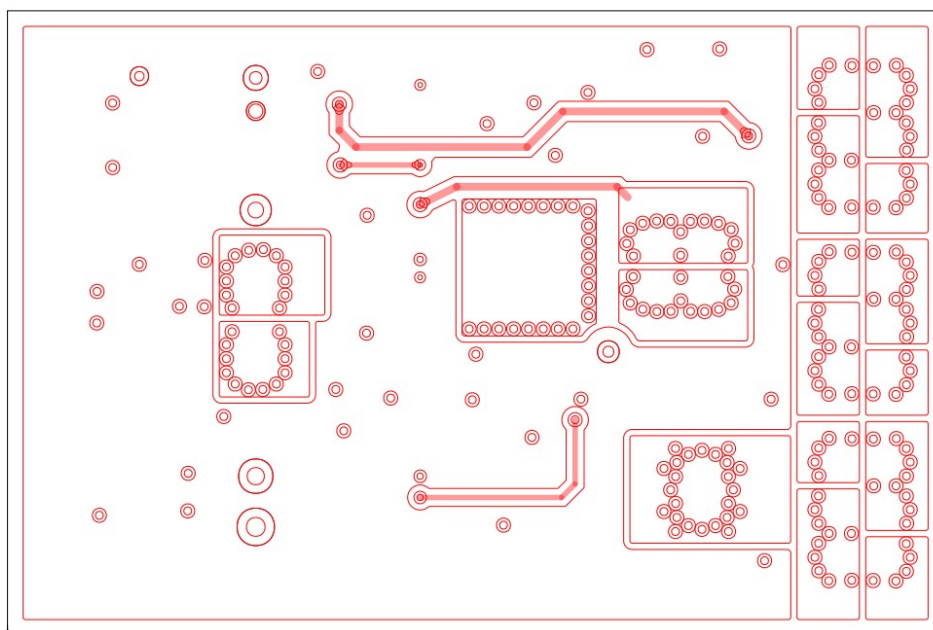
Zapojení obsahuje 3 LED drivery, což jsou proudové zdroje k LED diodám, kdy každý z nich využívá jiných prvků. Stěžejní jsou zde velká pouzdra jako SON8, DPACK, SOIC8, SOT223, na kterých se často vyskytují různé defekty. Samotné schéma zapojení (obr. 17) bylo navrženo v ORCAD ve spolupráci s techniky z Automotive Lighting.



Samotný layout byl vytvořen v programu Cadence Allegro DPS, kde byla vytvořena dvojvrstvá deska plošného spoje o velikosti 4 x 5 cm. Připojovací konektor JST byl umístěn na přední straně desky z boku, pro jednoduché připojení vodičů. Zátěžové rezistory reprezentují LED diody a jsou seřazeny pod sebou na straně. Pod rezistory jsou vytvořeny termální plošky stejně jako u LED diod pro odvod tepla. Tloušťka vodivých cest je definována na 0,5 mm. V případech, kdy jsou piny součástek tenčí, je zvolena tloušťka vodivé cesty 0,35 mm. Na okrajích desky byl definovaný zákaz vedení vodičů ve vzdálenosti 1 mm od hrany desky. Mezera mezi cestami je určena na hodnotu 0,5 mm a vodivé cesty nesmí být vedeny mezi vývody pouzder. Při návrhu se také věnuje pozornost, aby deska byla realizovatelná ručním pájením, proto je snaha vodiče táhnout od pinů alespoň 0,5 mm podélně se součástkou a následně až potom vodivou cestu směřovat tam, kam je potřeba.

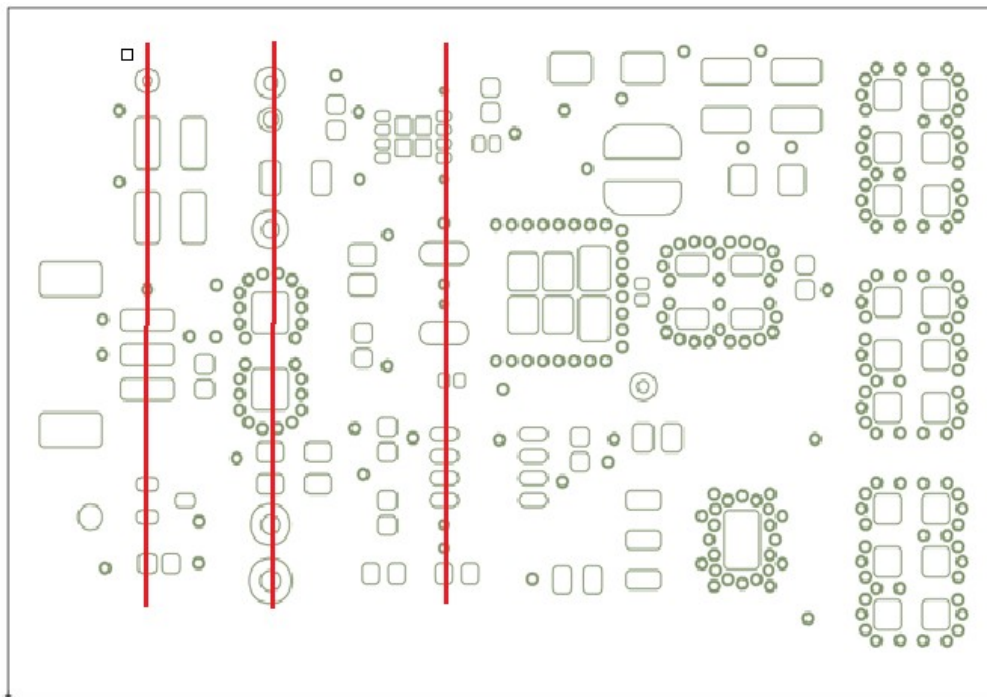


Obrázek 18: Rozložení návrhu na „TOP“ straně DPS

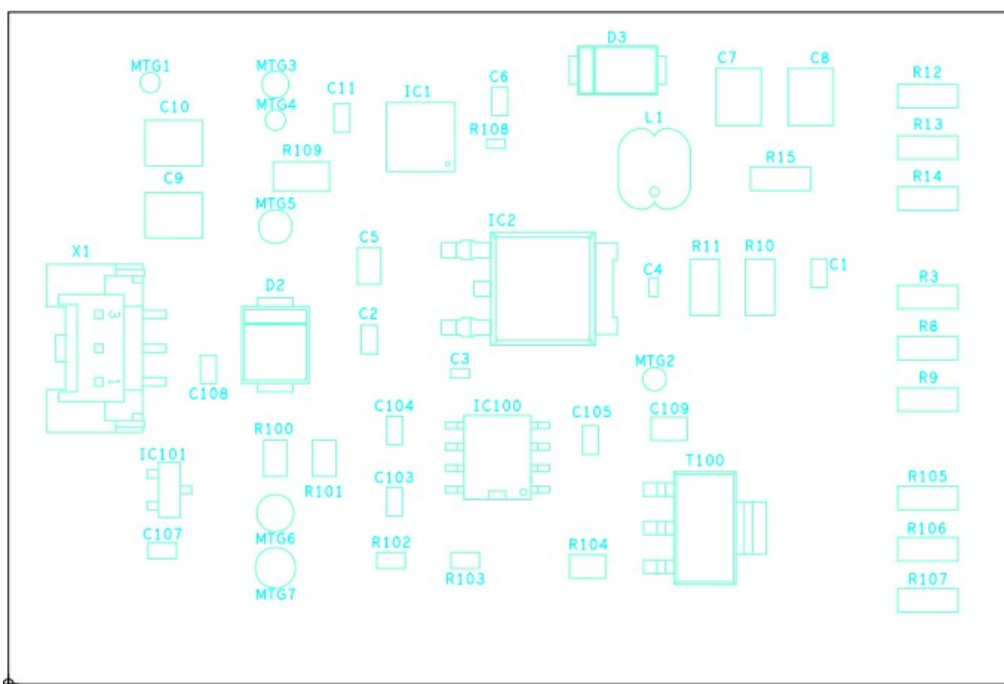


Obrázek 19: Rozložení návrhu na „BOTTOM“ straně DPS

Layout byl navrhovaný tak, aby byl částečně přizpůsoben pro mikrořez. Deska je předpřipravená pro dva hlavní řezy, které budou probíhat mezi součástkami.



Obrázek 20: Rozložení padů pro mikrovýbrus

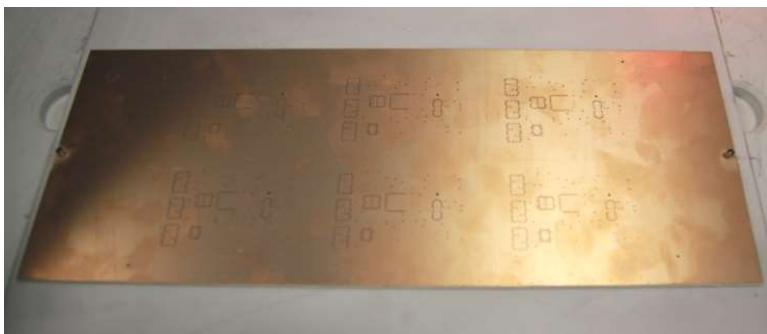


Obrázek 21: Osazovací předpis

5.2 Výroba vzorků v interní laboratoři AL

Jako základní materiál pro výrobu daných vzorků byla vybrána oboustranně plátovaná měď o síle 0,35 μm s tloušťkou substrátu 1,5 mm. Z důvodu úspory materiálu se deska rozdělila na dvě poloviny.

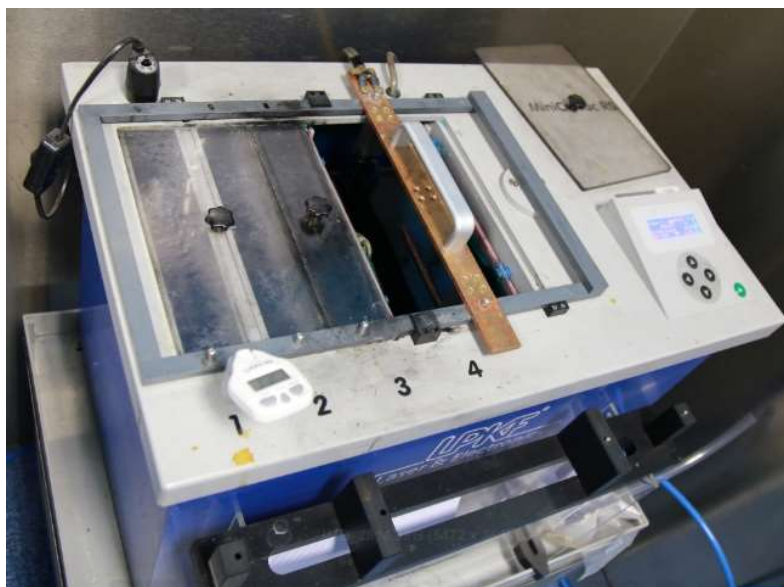
Materiál je uchycen do frézky, kdy pro správné uchycení do stroje je před samotným procesem nutno navrtat tzv. fiducial čili sesouhlasovací body. V dalším kroku je provedeno důlkování a následné vrtání prokovů a děr. Důlkování není běžný proces ve výrobě, nicméně zde je nutný pro eliminaci tvorby třísky a štěpení.



Obrázek 22: DPS po procesu vrtání

Po procesu následuje vyfouknutí všech děr stlačeným vzduchem, aby byly odstraněny zbytky spodní vrstvy mědi po vrtání. Deska je následně přebroušena pod tekoucí vodou pomocí brusného papíru, nebo brusné pasty. Při začišťování je kladena pozornost zejména prokovům a otvorům po frézování, které mají zdrsňený okraj po procesu. Následuje znovu opláchnutí a ofuk stlačeným vzduchem. Důležitá je optická kontrola, aby byly otvory čisté bez ořepů a zbytků po vrtání. Zde je velké riziko defektů prokovů. V případě špatně očištěných otvorů může dojít ke špatnému galvanickému pokovení a tím špatnému zvodivění děr.

Následuje proces čtyř lázní (obr. 23), kdy se v první lázni desky odmastí, jako druhý krok následuje čištění. K aktivaci povrchu dochází ve 3 lázni pomocí nanesení černého uhlíku na desku a do děr s prokovy. Je to z důvodu zvodivění povrchu, aby mohla být provedena poslední lázeň a to galvanické pokovení. Provede se oplach, sušení a mohou se vyfrézovat vodivé cesty a plošky na desce.

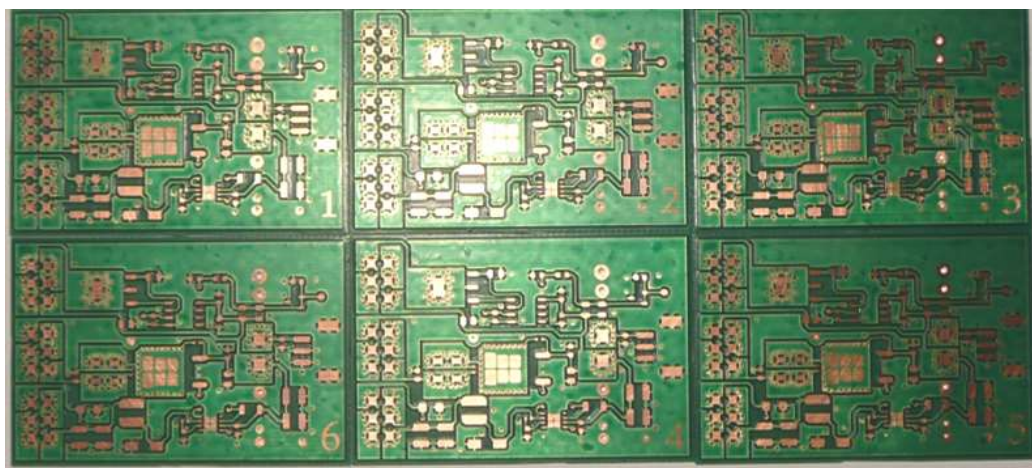


Obrázek 23: Lázně pro galvanické pokovení

Rozmíchá se soldermaska a pomocí válečku se nanese na očištěnou desku tak, aby nebyla nanese na prokovy a děr. Takto nanesená maska se nechá vytvrdit 10 minut při 80 °C v peci. Pomocí vytvořeného motivu se deska osvítlí UV zářením přes film a vyvolává se 30 sekund pohybem v uhlíčitane sodném. Vyvolanou a usušenou desku je nutné vytvrdit v peci při 160 °C po dobu 30 minut. Deska je připravená pro povrchové úpravy. V tomto případě stačí použít LPKF cleanru, kdy se očistí odmaskovaná měď od zoxidované mědi.



Obrázek 24: Příprava desky pro galvanické pokovení



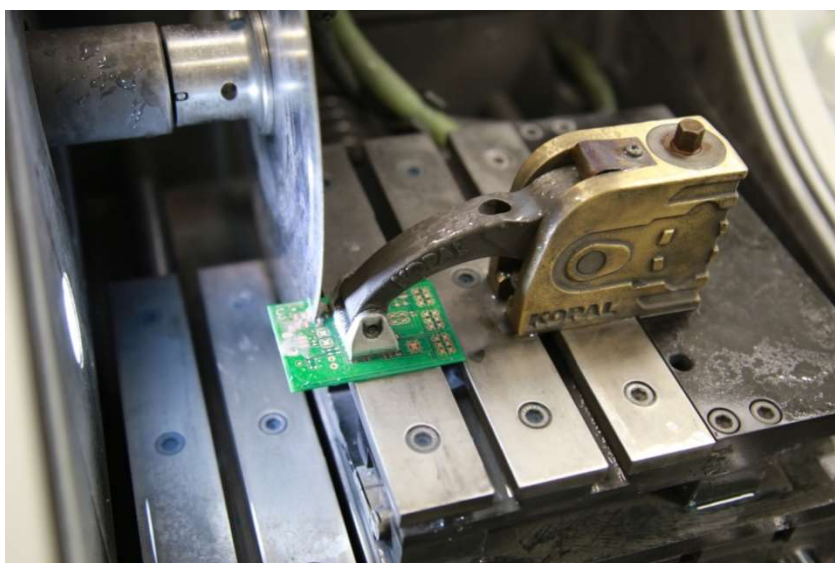
Obrázek 25: Vyhotovená DPS včetně nepájivé masky

5.3 Technika provedení mikrovýbrusu

Aby byla možnost kontrolovat prokovy mezi vrstvami, či nanesené vrstvy pokovení a defekty desky, byl proveden metalografický výbrus. Techniku zhotovení mikrovýbrusu popisuje norma IPC-TM-650 2.1.1.

K přesnému dělení materiálu byla použita pila Secotom-50, která umožňuje automatický režim. Chlazení probíhá pomocí dopadající chladicí kapaliny na kotouč. Před zahájením dělení materiálu je nutné překontrolovat stav chladicí kapaliny, aby se nacházela mezi ryskami Min a Max. Dále se pomocí tlačítka provede kalibrace zařízení.

Dle materiálu je vybrán řezací kotouč, přičemž jsou k dispozici dva typy. Prvním je diamantový kotouč E1D20, který je vhodný pro vzorky zalité v pryskyřici, plasty nebo pro materiály FR4, proto byl při řezání použit tento kotouč. Druhý mohl být dělicí kotouč 10S20 vyrobený z karbidu křemíku, který je vhodný pro nekovové materiály jako jsou plasty, sklolaminát a keramika. Z výběru upínacích zařízení je nutné vybrat vhodný pro upnutí určeného vzorku.



Obrázek 26: Detail řezu na pile SECOTOM-50

Pomocí automatického stolu je vzorek umístěn do správné polohy v ose X, kde je zajištěn přesný řez, po nastavení se zavře ochranný kryt. Následně se na ovládacím panelu nastaví několik parametrů, např. zvolený typ kotouče, otáčky, posun a délka řezu. Nyní je možné zahájit proces dělení materiálu.

Při dělení materiálu se musí dbát na to, aby byl zkoumaný vzorek velikostně optimální do standardizovaného tvaru formy pro zalévání a aby dělení proběhlo v dostatečné vzdálenosti od zkoumaného místa.

Pro zalévání vzorků byla použita dvousložková akrylátová pryskyřice ClaroCit Powder s ClaroCit liquid. Dle manuálu byly smíchány složky v daném poměru a proběhlo zalití. Zalévání bylo prováděno za studena s krátkou dobou tuhnutí a dostatečnou viskozitou pro zatečení do formy. Následně byly formy vloženy do tlakového hrnce, kde došlo k natlakování a vytvrzení. Díky tlakovému hrnci se získá vzorek bez bublinek a vzduchových mezer.



Obrázek 27: Formy, akrylátová pryskyřice, tlakový hrnec

Jelikož je potřeba zviditelnit žádané místo na zalitém výbrusu je nutno použít brousicí a lešticí zařízení Tegamin-25. Snahou je se probrousit k přesnému místu zkoumání na vzorku a následně leštěním dosáhnout vysoké

čistoty v pozorovaném místě. Přístroj je uveden do chodu, musí mít zapnutý přívod vody a vzorky jsou upevněny do držáků.



Obrázek 28: Broušící a leštící zařízení Tegramin-25

Je zde výběr ze dvou druhů držáků vzorků. Prvním z nich je držák vzorků pro středový přitlak a druhý držák je pro individuální přitlak. Zároveň se vybírají držáky o různých průměrech podle velikosti vzorků. Držák se vzorky se připevní do přitlačné hlavy zařízení.

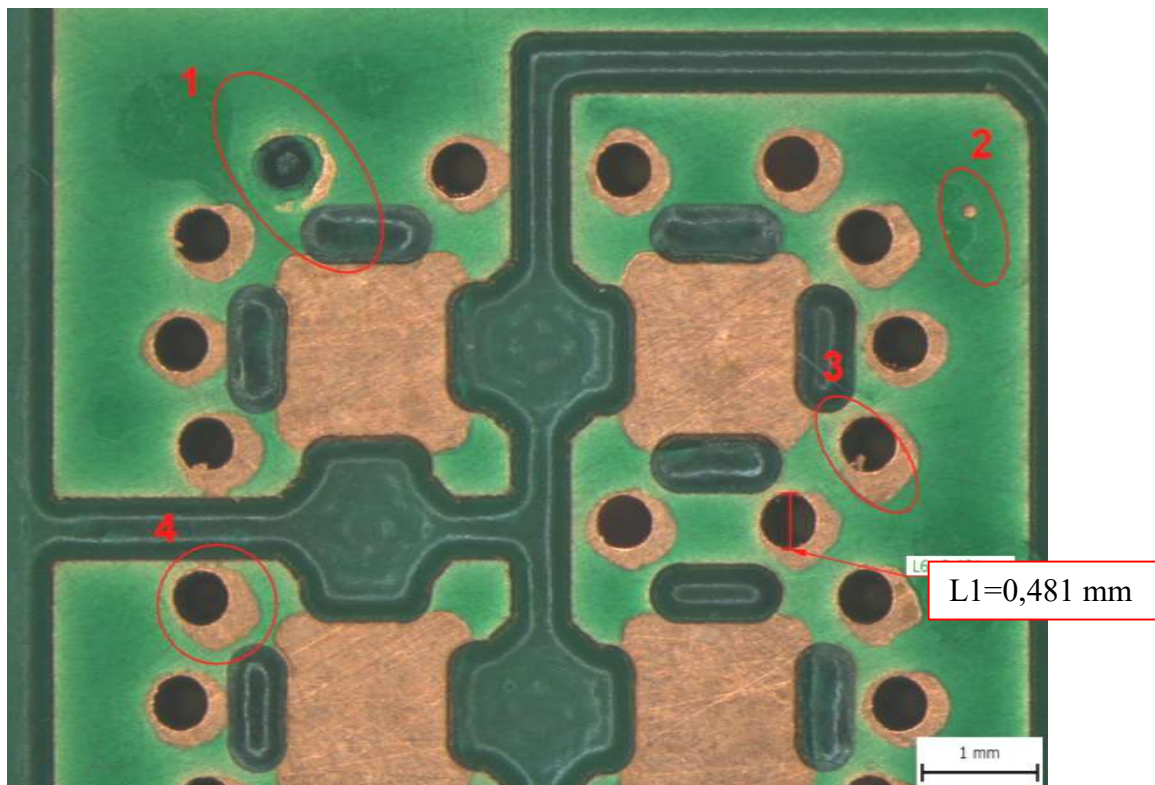
V hlavním menu zařízení se vybere „Speciment holder menu“ nebo „Single specimen holder menu“ dle použitého držáku, kde je dále přednastaveno 5 kroků dle typu broušícího/leštícího kotouče:

1. krok: broušící kotouč SiC na zarovnání hrany vzorku,
2. krok: leštící kotouč MD-Largo na leštění do rozlišení 9 μm ,
3. krok: leštící kotouč MD-Mol na leštění do rozlišení 3 μm ,
4. krok: leštící kotouč MD-Nap na leštění do rozlišení 1 μm ,
5. krok: kotouč MD-Chem pro chemické naleptání vzorku.

V každém kroku lze nastavit několik důležitých parametrů jako je přitlačná síla působící vzorkem na kotouč, doba opracování, rychlost otáčení hlavy, rychlost otočného stolu. Dle softwarových kroků jsou vybrány manuálně brusný/leštící kotouč a ten se připevní na magnetický otočný stůl. Provede se výbrus vzorku. Po každém kroku se použije sušička Lavamin, aby se zabránilo kontaminaci diamantových suspenzí mezi jednotlivými fázemi leštění.

5.4 Vyhodnocení vzorků z laboratoře AL

Nejprve došlo k vyhodnocení samotných desek z interní laboratoře, které byly položeny pod mikroskop. Použitý mikroskop byl typu OLYMPUS SZX7. Jelikož se vady na deskách opakovaly, byla vybrána tato deska jako ilustrativní příklad vzhledem ke koncentraci vad.



Obrázek 29: Deska plošných spojů z interní laboratoře č. 4

Defekty, které lze na desce pozorovat, a jsou označeny čísly:

1) Zatečení nepájkivé masky do chladicího prokovu

Příčinou bývá nedostatečné vymytí desky v uhličitanu sodném při vyvolání. Pro zabránění tohoto defektu na dalších prototypových deskách je nutné prodloužit čas vyvolání na 1 minutu, nebo zajistit proud kapaliny, který důkladně vymyje otvory v kratším čase bez potřeby pohybu desky v lázni.

2) Blistering (puchýře), delaminace nepájkivé masky

Důvodem vzniku puchýřů bývá špatná předúprava povrchu mědi a s tím spojená nízká přilnavost nepájkivé masky. Při skladování vzniknou na povrchu mědi oxidy, které nejdou vždy zcela odstranit. V našem případě se jedná pouze o lokální vadu na jednom vzorku. Příčinou může být také nedokonalé promíchání soldermasky, kdy se válečkem nanese na desku a následně dojde k bodovému odtržení. Je třeba také definovat životnost válečku, aby nedocházelo k odpadávání vláken.

3) Otřepy po vrtání

Otřepy vznikají při výrobě opotřebovaným vrtákem, nesprávně zvoleném posuvu, špatnou volbou vrtáku včetně vrtáku z nevhodného materiálu či se špatným nebo nedostatečným povlakem. Dalším podstatným faktorem může být špatné začistištění po procesu vrtání. V tomto případě došlo k nedostatečnému ofuku stlačeným vzduchem a krátkou dobou broušení pod tekoucí vodou.

4) Špatné sesouhlasení motivu s deskou

Po natisknutí motivu na film a jejímu chladnutí dochází k tepelnému namáhání filmu, což způsobuje smršťování v řádu μm , zároveň je film závislý na teplotě okolí a na vlhkosti. Díky této teplotní roztažnosti folie není možné exaktní sesouhlasení. Pro dokonalost by bylo nutné provozovat prostory s kontrolovanou vlhkostí a konstantní teplotou. Pro zlepšení procesu je možnost film rozdělit na menší části a sesouhlasit jednotlivé DPS zvlášť. Lidský faktor a zkušenost obsluhy zde hrají důležitou roli.

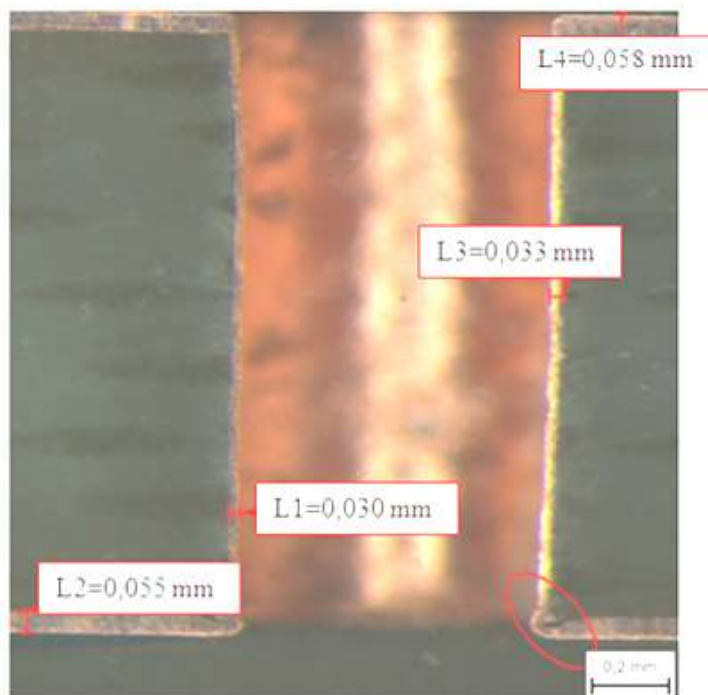
5.5 Vyhodnocení mikrovýbrusu na vzorcích AL

Metalografickým výbrusem jsou vyhotoveny 4 zalité vzorky z desek č. 2 a č. 3. Z každé desky jsou vybrány a zalité 2 vzorky označené písmeny A a B. Vyhodnocení probíhalo v souladu s normou IPC-A-600.

• Deska plošného spoje 2

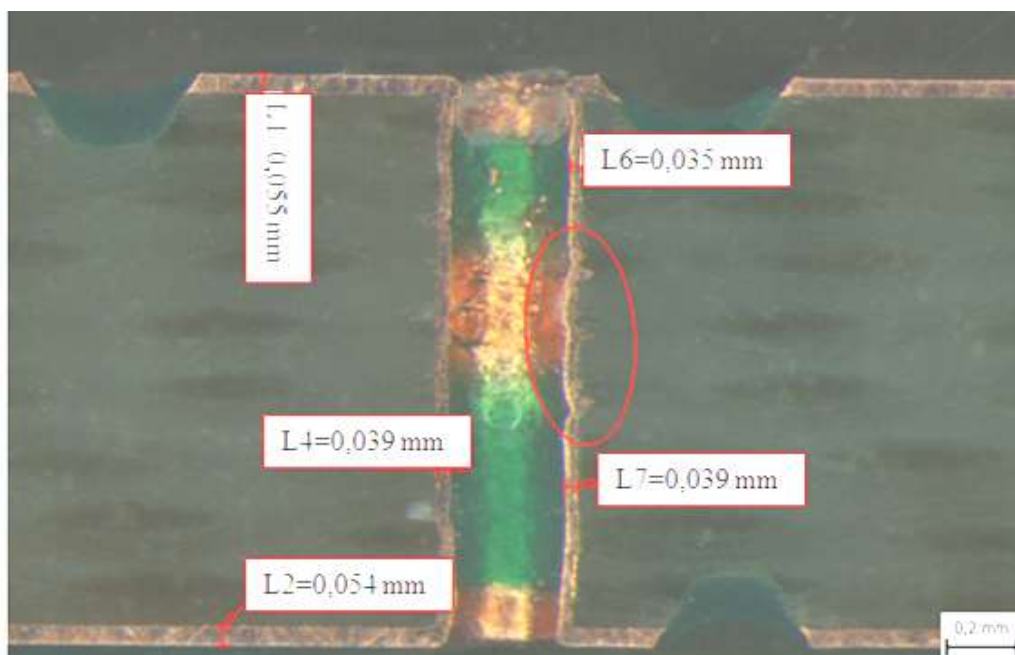
Snímek desky č. 2-A zobrazuje galvanicky pokovený prokov. Při vyhodnocování došlo ke změření tloušťky na více místech, z kterých byl vytvořen aritmetický průměr pro další výpočty. Díky tomu lze odvodit tloušťku plátované mědi, která proběhla procesem začišťování a broušení. Změřené hodnoty plátované mědi a galvanického pokovení jsou změřené hodnoty $58\ \mu\text{m}$ a $55\ \mu\text{m}$. Hodnoty galvanického pokovení jsou $33\ \mu\text{m}$ a $30\ \mu\text{m}$. Po zprůměrování a odečtení hodnot vyplývá, že tloušťka plátované mědi je namísto původních $34\ \mu\text{m}$ ubrána čištěním na přibližných $25\ \mu\text{m}$.

Spodní pravá část prokovu v červeném kruhu zobrazuje dva defekty. Prvním z nich je tzv. "Corner crack", kdy dochází k oslabení napojení dvou vrstev. První vrstvy plátované mědi s pokovenou galvanickou mědí a druhé vrstvy, což je galvanické pokovení vnitřní strany otvoru. Toto oslabení zhoršuje vodivost prokovu a v nejhorších případech může crack přerušit galvanické pokovení úplně. Další defekt vyskytující se v této oblasti je tzv. "Burr Pushed into holle", kdy je galvanické pokovení vystrčeno do samotného otvoru. Je to dáno špatnou předpřípravou povrchu před galvanickým pokovením, kdy s největší pravděpodobností lze odvodit v tomto případě, že otvor byl vrtán z horní části snímku dolů, kdy na spodní části zůstaly otřepy, které byly nedokonale začištěny.



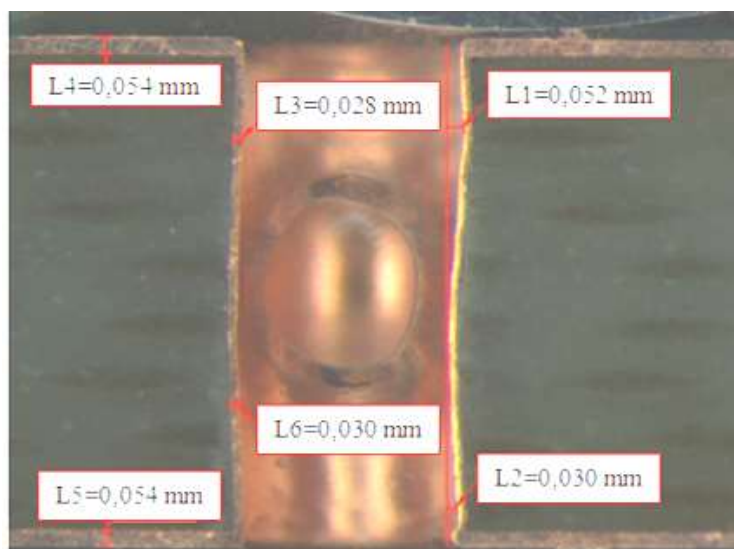
Obrázek 30: Vzorek č. 2-A

Na vzorku z desky č. 2-B je jasně patrné zatečení nepájivé masky do prokovu a její špatné vymytí v uhlíčitanu sodném při vyvolání. Obecně lze říci, čím menší jsou otvory, tím je obtížnější zateklou nepájivou masku z nich vymýt. Pro zabránění tohoto defektu je dobré prodloužit čas vyvolání, nebo zajistit proud kapaliny, který důkladně vymyje otvory.



Obrázek 32: Vzorek č. 2-B

Dalším patrným defektem v tomto prokovu je tzv. "Drill wall tear / wicking". Během vrtání došlo k narušení vnitřní struktury otvoru, což je zapříčiněno tupým nebo špatně zvoleným vrtákem. Vrták narušil struktury desky, kam se následně nanesl i uhlík, který vyplnil póry, a došlo k nanesení galvanického pokovení do těchto pórů. Tloušťka nanesené mědi se jeví v prokovu jako větší oproti předešlému vzorku, avšak zdání může klamat z důvodu pórovitosti povrchu.



Obrázek 31: Detail vzorku č. 3-A s přiblížením 50x

• Deska plošného spoje 3

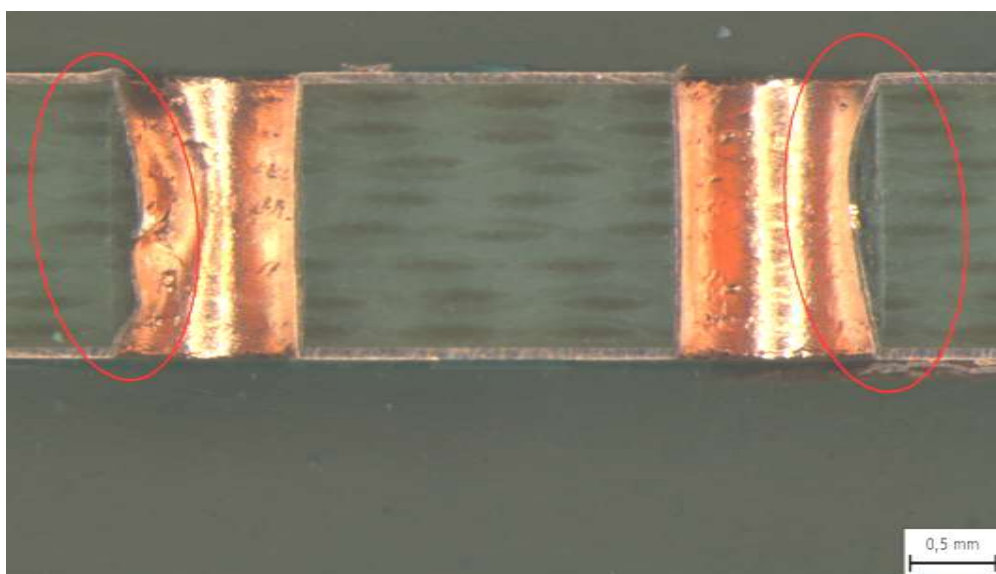
Na vzorku z desky č. 3-A je vidět nedokonalá rovinnost pravé stěny prokovu. Tento problém může nastat prohýbáním vrtáku během procesu vrtání. V tomto případě se jedná o odskok otvoru 52 μm . Tloušťka galvanické mědi je v průměru 29 μm z čehož plyne, že vrstva plátované mědi po odečtení galvanického pokovení vychází na 25 μm .

Další snímek vzorku 3-A popisuje špatné sesouhlasení frézy na straně top a na straně bottom. Můžeme si všimnout odskoku 147 μm .



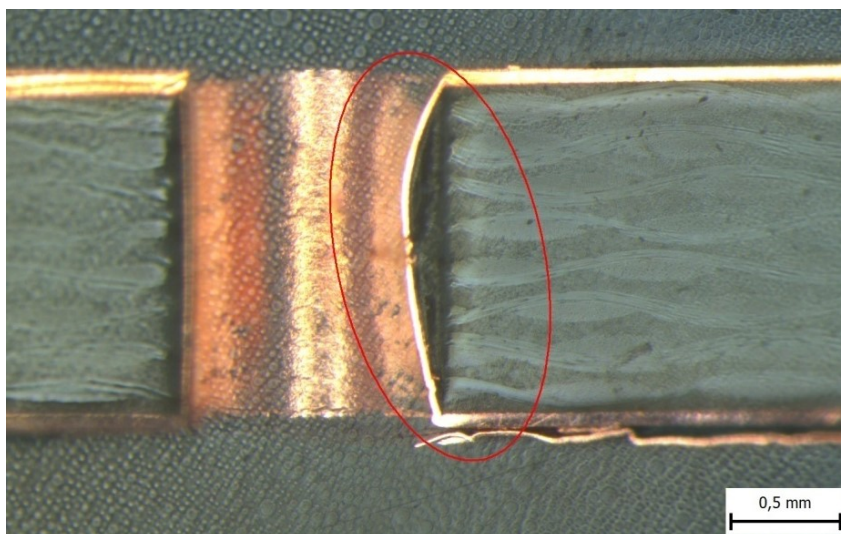
Obrázek 33: Vzorek č. 3-A

Poslední testovaný vzorek 3-B se vymyká ostatním vzorkům svojí velice špatnou kvalitou prokovů. Jak lze vidět na snímku z mikroskopu, prokovy jsou vyvalené ze stran. Dokonce u levého prokovu je narušené galvanické pokovení. Pokud by se deska termálně namáhala, tak lze předpokládat, že tento jev může nastat, nicméně deska neproběhla teplotními šoky ani jinému termálnímu namáhání. Další úvahou se může jevit špatné usazení desky při mikrovýbrusu, kdy by byl vzorek usazen v jiném než kolmém úhlu vůči brusnému kotouči a následně broušen. Tuto úvahu však můžeme také vyloučit, jelikož každý prokov je vyvalen z jiné strany.



Obrázek 34: Vzorek č. 3-B

V obrysu prokovu je vidět, že vrták vytvořil požadovaný otvor a až poté došlo k jeho vyvalení a následnému pokovení. Další možnou chybou může být chyba procesu samotného mikrovýbrusu, kdy díky nešetrnému řezání a vlivem vibrací v blízkosti otvorů se mohla nanést galvanická měď delaminovat.

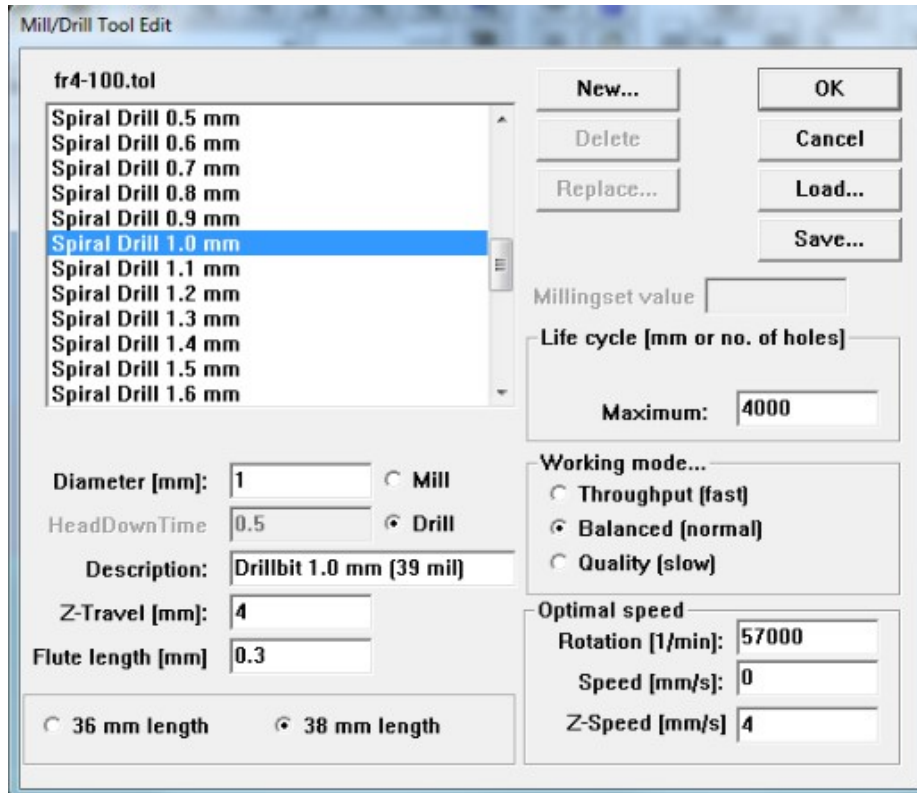


Obrázek 35: Detail vzorku č. 3-B

5.5.1 Sledování stálosti procesu:

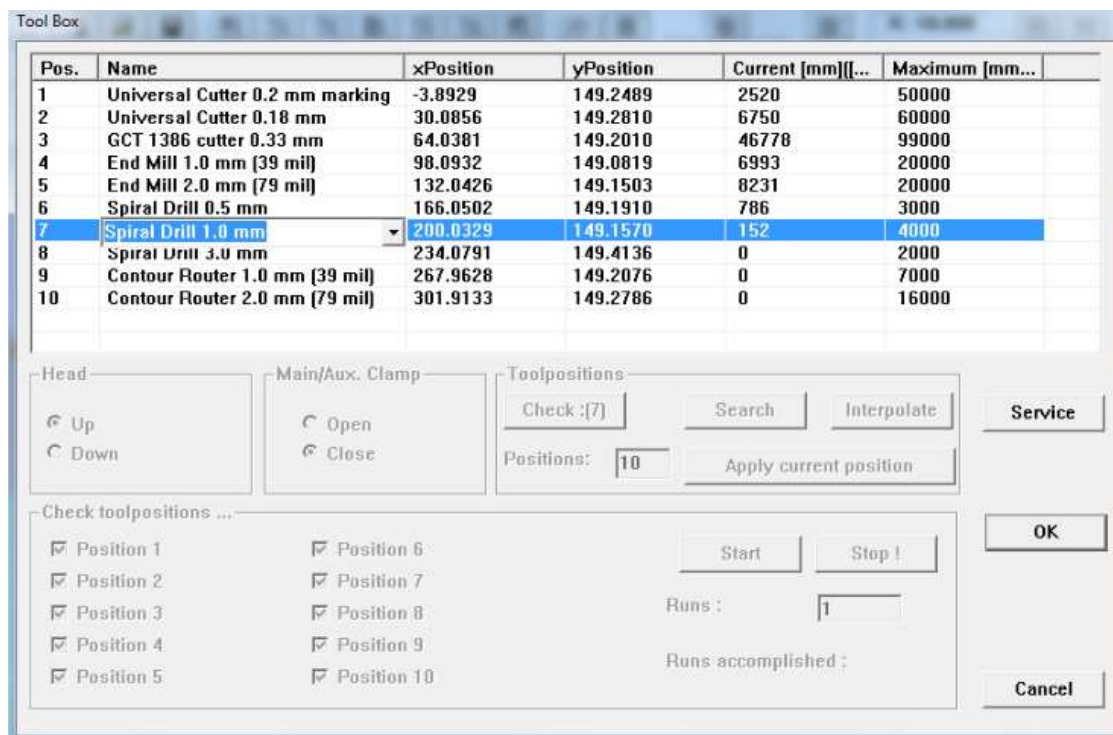
Pro experimentální účely byl proveden další mikrovýbrus na vzorcích z AL, který byl uskutečněn po zavedení systémového sledování životnosti vrtacích cyklů pomocí softwaru. Hlavní sledované parametry jsou počet vyvrtaných otvorů u vrtáků a ujetá vzdálenost frézou.

Pro každý vrták bylo nutné nastavit počet vrtacích cyklů dle výrobce, otáčky a posuv v Z ose zůstává stejný dle původního nastavení.



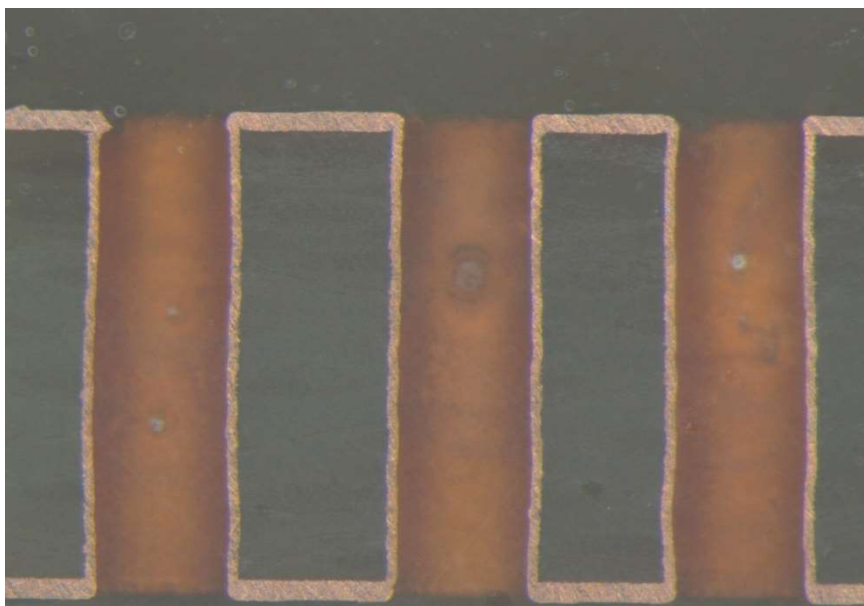
Obrázek 36: Ukázka nastavení pro vrtání

Každý vrták má nastavenou jinou individuální životnost. Na obrázku níže je vidět příklad otvoru, provrtané vrtákem 1,0 mm s jeho XY pozicí v zásobníku nástrojů. Zároveň je zde aktuální počet vyvrtaných otvorů 152 a maximální nastavený počet provedených otvorů 4000.



Obrázek 37: Sledování ostroty vrtáků pomocí softwaru

Podle nastavení, které je ukázáno na předchozích obrázcích bylo provedeno samotné vrtání zkušních otvorů o průměru 0,5 mm v 1/4 životnosti vrtáku, následně byl proveden mikrovýbrus těchto otvorů a ty byly shledány bez vážných chyb.



Obrázek 38: Sledované zkušební otvory s přiblížením 40x

5.6 DPS od externích dodavatelů

Pro potřebu Automotive Lighting byly testovány 2 dodavatelé DPS desek. Prvním dodavatelem je firma Gatema a druhou firma Pragoboard. Do obou firem byl zaslán stejný soubor v podobě Gerber dat. Obě firmy si desky zpanelizovaly. Testování proběhlo v souladu s normou IPC-A-600 a se stanovenou metodikou z teoretické části.

1) Parametry, pro objednání

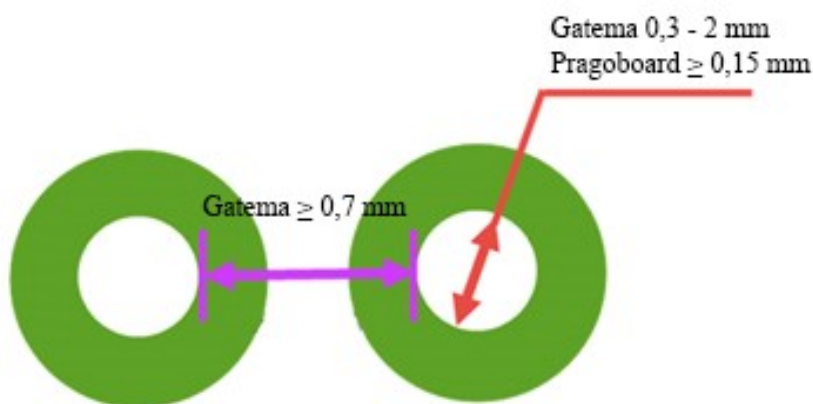
Při objednávání desky DPS firmy potřebují několik souborů, které se vygenerují v programu Alegro a pošlou se dodavateli desek.

• SOLDERMASK_TOP.art	Vrchní nepájivá maska
• TOP.art	Vrchní měděná vrstva
• INNER_1.art	Vnitřní měděná vrstva
• INNER_2.art	Vnitřní měděná vrstva
• BOTTOM.art	Spodní měděná vrstva
• SOLDERMASK_BOTTOM.art	Spodní nepájivá maska
• OUTLINE_BOARD.art	Obrysy jednotlivých desek
• OUTLINE_PANEL.art	Obrys panelu
• DRILL_PLAN.art	Vrtací plán
• MILL_PLAN.art	Plán frézování
• NC_DRILL-1-2.drl	Plátované otvory mezi vrstvami
• NC_DRILL-1-2-np.drl	Neplátované otvory mezi vrstvami
• NC_MILL.rou	Fréza pro opracování na můstky
• nc_param.txt	

Dále je třeba uvést v objednávce požadavky jako je základní materiál FR4 - ISOLA 400 (ideální pro vícevrstvé DPS v automobilovém průmyslu, vhodný pro prostředí s vyšší teplotou Tg 150 °C), povrchová úprava HAL, barva nepájivé masky – zelená, počet vrstev na desce 2, rozměr panelu a počet kusů. Pragoboard akceptuje pouze Gerber data. Gatema přijímá jak Gerber data, tak i Eagle.

2) Konstrukční limity

- Gatema:
 - Otvor 0,3 – 2 mm, vzdálenost mezi hranami otvorů minimálně 0,7 mm
 - Nejmenší šířka spoje 100 μ m
 - HAL 2 – 40 μ m



Obrázek 39: Průměry děr a jejich vzdálenosti u firem

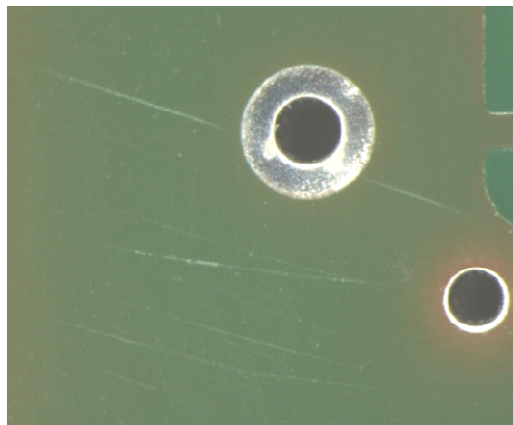
- Pragoboard:
 - Otvor minimálně 0,15 mm, vzdálenost mezi otvory jakákoliv – výroba probíhá na „vakuovém stole“
 - Nejmenší šířka vodivého spoje 100 μm
 - HAL překvapivě uváděných 6 – 8 μm

V průběhu přípravy daného vzorku se tyto limity zahrnuly již ve fázi návrhu layoutu, aby obě firmy byly schopny vzorek vyrobit.

3) Balení a rychlost dodání (výroby)

Gatema vždy dodává DPS včetně desky, která se dává pod DPS při frézování. Bohužel tato deska způsobuje znečištění DPS prachem a je zde riziko poškrábání povrchové úpravy těmito deskami. Celá DPS včetně těchto podkladových desek z frézování je zalita v bublinkovém obalu. Hlavní záměr firmy byl zřejmě ochránit desky proti ohýbání, nebo zlomení, avšak tato možnost je nevhodná. Rychlost zhotovení a dodání byla 10 dnů.

Pragoboard dodal desky v hermeticky uzavřeném bublinkovém obalu a celá deska byla uložena ve vypodložené krabici. Rychlost vyřízení objednávky a dodání byla 12 dnů.



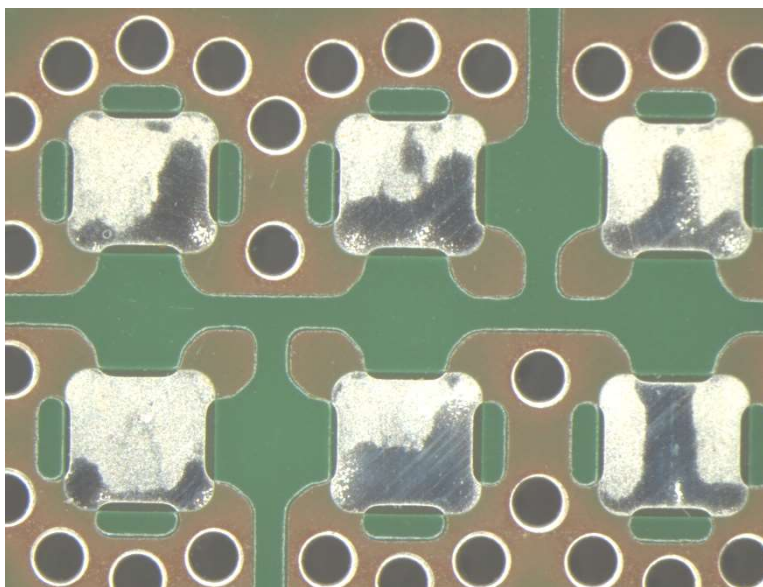
Obrázek 40: Škrábance na DPS dodávané firmou Gatema

4) Povrchová úprava, nepájivá maska, vizuální defekty

Jak je všeobecně známo, proces HAL má poměrně špatnou rovinnost. Rovinností se myslí geometrická tolerance povrchu, čím je hodnota rovinnosti vyšší, tím je méně vhodný povrch pro osazování. Zjednodušeně tedy nízká rovinnost znamená rovný povrch. Z tohoto důvodu není proces HAL vhodný zejména pro DPS, kam se umísťují LED diody, které vyžadují naprosto rovný povrch. Nicméně díky své nízké ceně je stále používán v elektrotechnickém průmyslu.

Samotný proces HALU spočívá v ponoření DPS do roztavené pájky a při zpětném pohybu je ofouknuta vzduchovými noži tak, aby byla pájka vyfouknuta z otvoru a z povrchu nepájivé masky. Pro většinu aplikací metody HAL je používána bezolovnatá pájka, která může obsahovat různé slitiny a příměsi.

Již při detailnějším zkoumání je jasné, že povrchová úprava firmy Gatema je horší jak u firmy Pragoboard. U HALU od firmy Gatema je patrná vysoká hodnota rovinnosti nanesené vrstvy. Může to být způsobeno několika faktory,



Obrázek 41: Vysoká hodnota rovinnosti u DPS

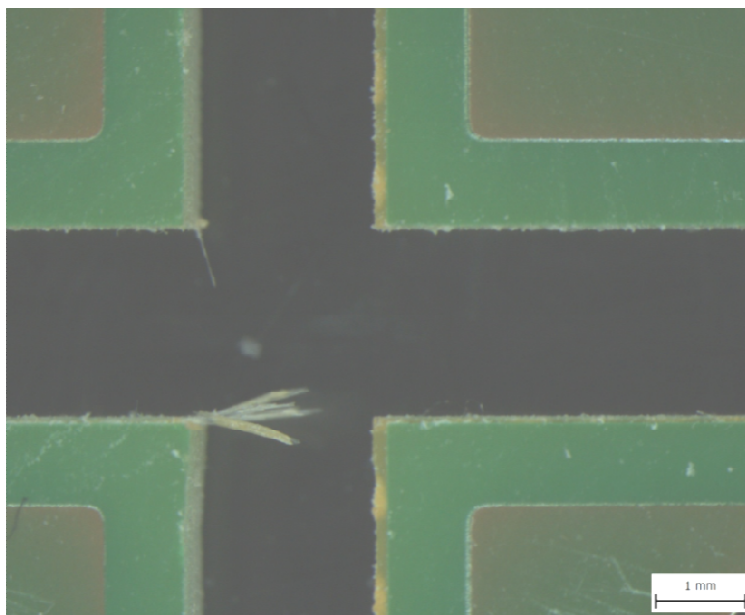
jako je stáří lázně, špatným dodržováním intervalů výměny lázně, apod. Zároveň je při zkoumání vidět směr vytahování desky z lázně, kdy docházelo k odstranění přebytečného cínu pomocí vzduchových nožů. Z mikroskopu lze spatřit v několika případech, že povrchová úprava sahá i mimo pady součástí do vodivých cest. V tomto případě tato chyba výroby nemá vliv na funkčnost vzorku. U firmy Pragoboard má povrchová úprava HAL daleko nižší hodnotu rovinnosti, a zároveň nedochází k nanesení pájky na okolní cesty.

Každý z výrobců garantuje jinou rovinnost HALU. Pro Gatemu jsou hodnoty rovinnosti mezi 2 – 40 μm a pro Pragoboard 6 – 8 μm .

V obou případech výrobců DPS byla zvolena zelená nepájivá maska pro ochranu povrchu v každém z případů s odlišným odstínem. Na obou panelech jsou nanесeny nepájivé masky kvalitně bez patrných puchýřků a jiných defektů. Pragoboard používá nepájivou masku typu PSR-4000 GP01EU což je síťotisková teplem vytvrzovaná, tekutá, dvousložková světlocitlivá nepájivá maska, lesklejší oproti masce od Gately která je matnější. Nepájivé masky používané Gatemou jsou Peters a Sun Chemicals.

5) Frézování

V případě frézování obrysů desek je nejdůležitější mít dostatečně ostrý nástroj z vhodného materiálu, dále je potřeba optimalizovat obráběcí podmínky (rychlost posuvu, otáčky) a správnou polohu nástroje vůči obráběné desce. Pokud se tyto podmínky dodrží, lze získat rovný řez bez zubů a otřepů. Na obrázku 42 je ukázáno, že v případě firmy Gatemala obsahuje každá deska otřep jednoho rohu. Tento otřep může být způsoben jak tupým nástrojem, tak nevhodně zvoleným pohybem desky vůči nástroji. Pokud se fréza otáčí stejným směrem, jako se pohybuje obráběná deska, tak otřepy nemohou být uříznuty, protože zubům frézy jednoduše vybočí. Řešením by bylo frézovat každou část okraje desky oběma směry, ale to je časově náročnější.



Obrázek 42: Otřepy na rohu desky

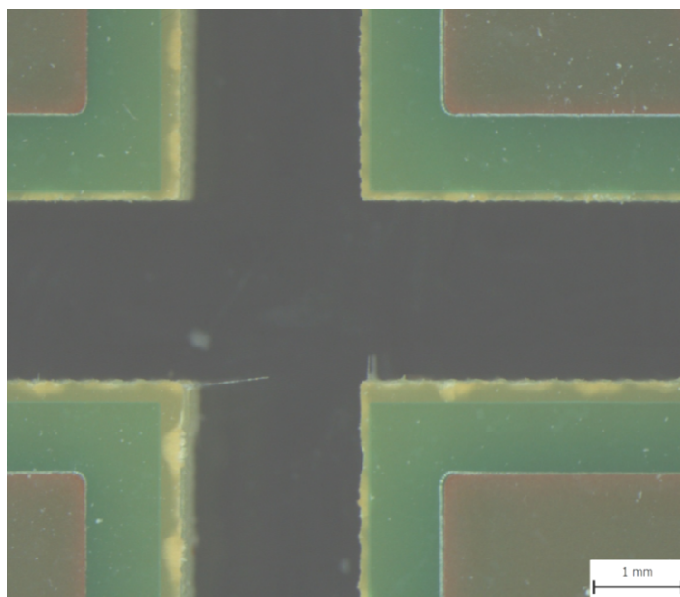
V IPC normě se tento jev nazývá tzv. "nonmetallic burrs". Norma říká, že roztřepení vláken problematického místa je možné sledovat až 40x zvětšené. Vzhledem k viditelným otřepům z Gately by její desky neprošly IPC normou.

Pravidlem je také odmaskovaný okraj desky, aby fréza neřezala přes masku. V tomto případě je viditelně odmaskovaná pouze jedna strana desek. Pokud se frézuje zamaskovaný okraj desky, vzniká nebezpečí poškození, nebo sloupnutí masky.

V druhém případě Pragobordu je viditelná náhodná delaminace skelných vláken na některých stěnách desek plošných spojů. Může to být způsobeno tupým nástrojem nebo nedostatkem lepidla při laminaci desky. Dalším potenciálním defektem se jeví vyštípnutí

materiálu z okraje DPS. V případě, že by desky byly více vybrané z okraje a vzdálenost k padu, nebo vodivé cestě by byla menší jak 2,5 mm, nebo vybrání okraje DPS by zabíralo více jak 50 % vzdálenosti od okraje desky k vodivé cestě nebo padu DPS, tak by desky podle normy IPC byly nevyhovující. V tomto případě je volené dostatečně velké technologické okolí okolo DPS a vzdálenosti jsou dostatečné pro splnění normy.

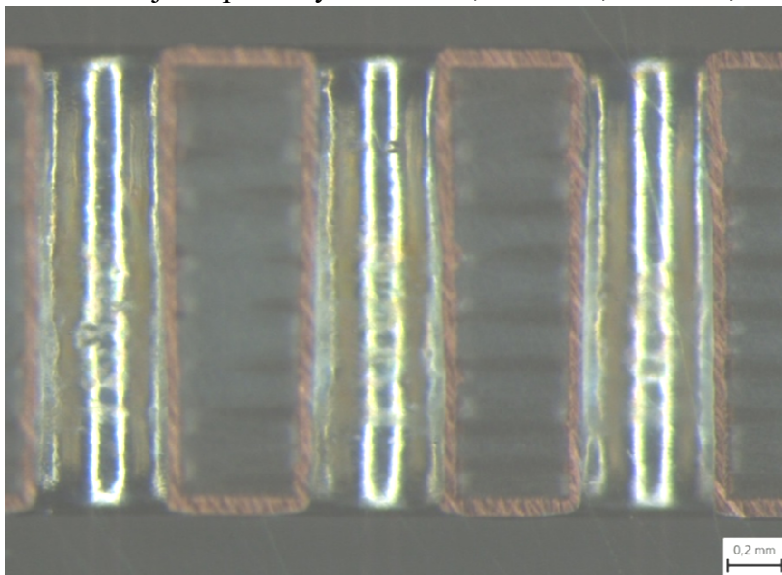
Podstatná nevýhoda slisovaných laminátů je, že na okrajích řezů jsou nerovné hrany plné kousků vláken tkaniny. Ty se mohou v průběhu výroby DPS uvolnit a mohou tak způsobit zacpání otvoru v šabloně, nebo mohou negativně ovlivnit tvar a vlastnosti pájeného spoje. Dalším druhem defektu, který tyto nečistoty mohou způsobit, je nadzdvihnutí součástky pokud by se dostala nečistota na povrch desky před osazením součástky. Aby se předcházelo těmto defektům, holé lamináty se před tiskem pájecí pasty čistí od částec laminátu a nečistot.



Obrázek 43: Delaminace skelných vláken

6) Provedení prokovů

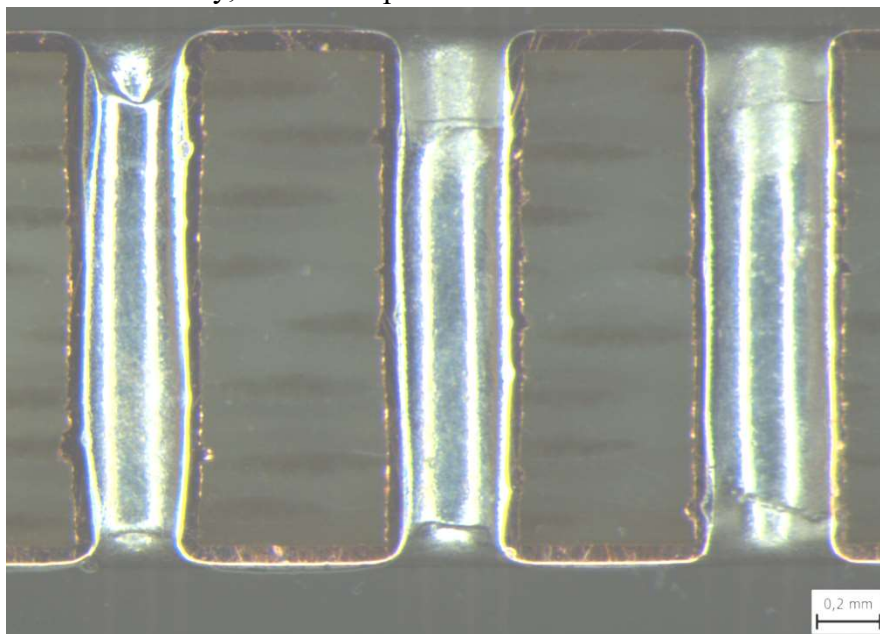
Provedení prokovů bylo ověřeno pomocí destruktivní technologie mikrovýbrusu. Od každého výrobce byly vybrány krajní desky panelu a na nich byl proveden řez. Při mikrovýbrusu se zaměřuje na prokovy velikostí 0,5 mm a 0,4 mm a 0,3 mm.



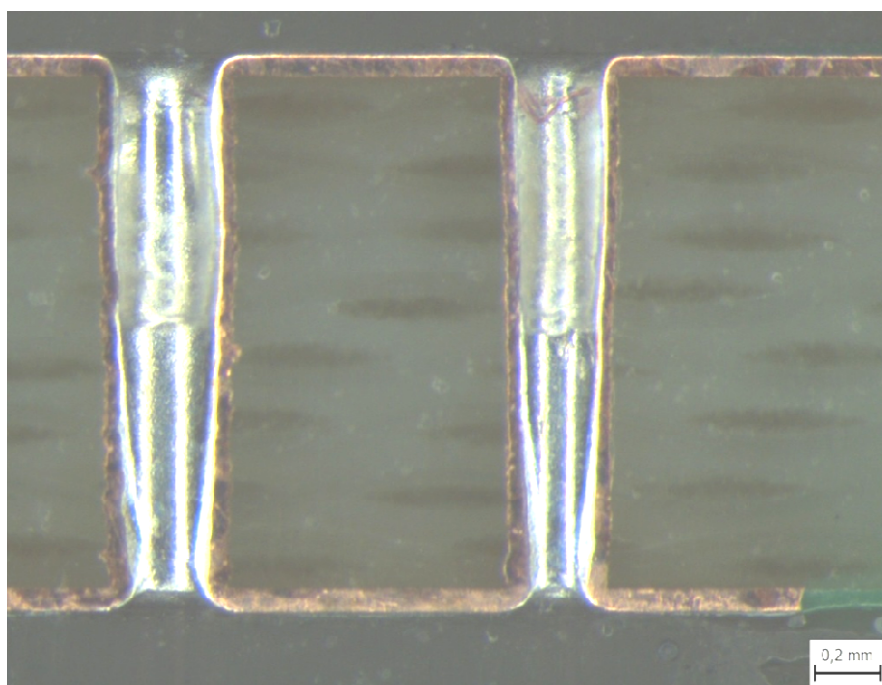
Obrázek 44: Prokov č. 1 průměr otvoru 0,5 mm deska Pragoboard

Defekty v podobě nepokovených stran otvorů tzv. "voidů" se nevyskytují ani u jednoho z výrobců, jelikož není porušena galvanicky nanesená měděná vrstva. Pragoboard má

vyhotovené prokovy 0,5 mm hladké (obr. 44), bez viditelných defektů. U Gatemy je zjevné, že u tohoto rozměru byl použit tupější vrták, nebo nedošlo k dostatečné úpravě povrchu. Vrták narušil strukturu desky, kam se následně nanese i uhlík, který vyplnil póry, a došlo k nanesení galvanického pokovení do těchto pórů (obr. 45). V IPC se tento jev nazývá tzv. "Drill wall tear / wicking". V prokovech jsou patrné vzduchové bubliny, vzniklé v zalévací hmotě. Vzniklé bubliny mohou být způsobeny tím, že po zalití má být vzorek vložen do podtlakové komory, nikoliv do přetlakové.



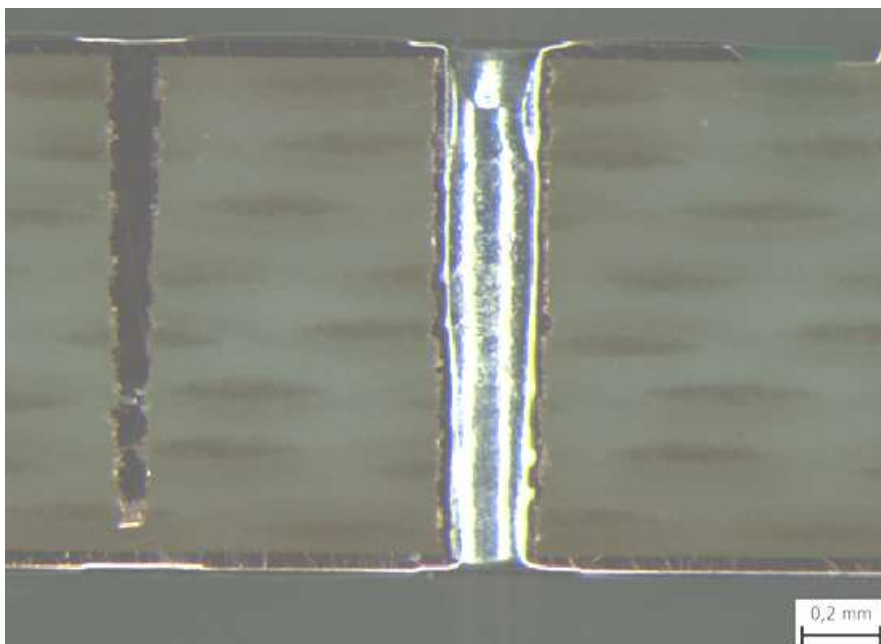
Obrázek 46: Prokov č. 1 průměr otvoru 0,5 mm deska Gatema



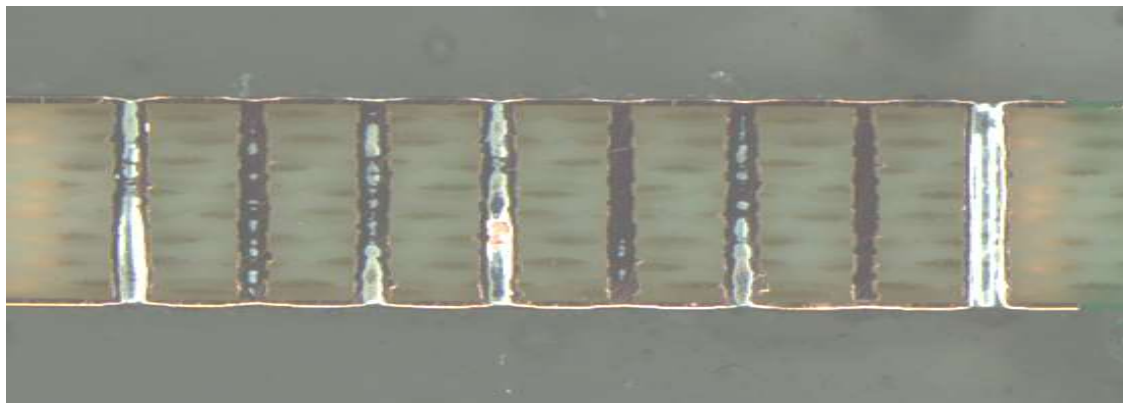
Obrázek 45: Prokov č. 2 průměr otvoru 0,4 mm a 0,3 mm Gatema

Prokovy zhotovené v rozměrech 0,4 mm a 0,3 mm má o poznání kvalitněji provedené firma Gatema (obr. 46). Z výbrusu dodané DPS na obrázku 47 je vidět nepřesnost vrtání

od Pragoboardu. V návrhu byly otvory seřazeny v jedné rovině. Nelze se domnívat, že tato chyba vznikla technologickým postupem mikrovýbrusu. Nesouměrnost lze podložit snímky z prokův v přiloženém obrázku 48. Dalším jevem u tohoto výrobce jsou vyskytující se defekty "Drill wall tear / wicking". Ve spodní části prokovu č. 2 (obr. 47) je galvanické pokovení vystrčeno do prostoru, vzniká tzv. "Burr Pushed into holle", prokov je omezený na průměru.

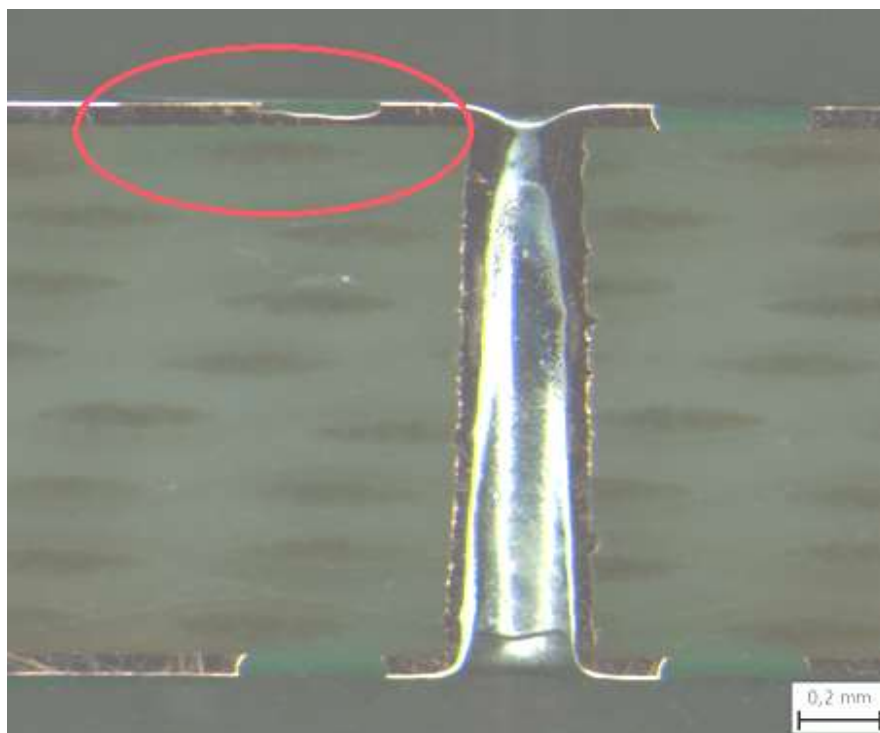


Obrázek 47: Prokov č. 2 průměr otvorů 0,4 mm a 0,3 mm Pragoboard



Obrázek 48: Nepřesnost vrtání od Pragoboardu při zvětšení 25x

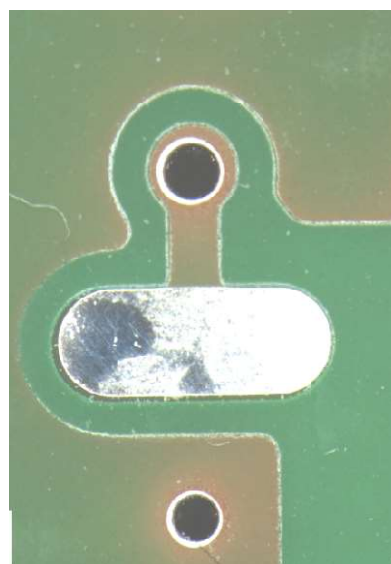
Na snímku z mikrovýbrusu je vidět signálový prokov, zbroušený nesymetricky, kdy horní část prokovu je více probroušená než spodní. V levé horní části DPS je vidět pad s povrchovou úpravou. Ze signálového prokovu vede vodivá cesta k padu, která je narušená. Pro bližší určení příčiny defektu byl vytvořen rentgenový snímek problematického místa.



Obrázek 49: Defekt vodivé cesty



Obrázek 51: Rentgenový snímek broušeného místa.



Obrázek 50: Detail broušeného místa se zvětšením 40x

Z rentgenu je patrná mírná nesymetrie broušení vzorku. Po zalití vzorku je místo na samotném konci vodivé cesty, což je viditelné v podobě tmavších míst. Nejsvětější místa na rentgenovém snímku jsou místa s odleptanou měďí ze strany TOP. Vedle odleptaného místa se nachází tmavší proužek měďi, což je okraj vodivé cesty, která spojovala pájecí pad se signálovým prokovem.

Hrany vodivé cesty nejsou nikdy ideálně kolmé, většinou bývají zkosené a rozšiřují se, v horším případě podleptané a zužují se, kdy tvoří převis tzv. "overhang". Lze tedy tvrdit, že bylo dosaženo při mikrovýbrusu samotné hrany vodivé cesty, která se již pomalu ztrácela. Tento jev nelze tehotnit jako defekt.

7) Tabulka srovnání

Tabulka 6: Tabulka srovnání firmy Gatema a Pragoboard

	Gatema	Pragoboard
Vstupní data	Program Gerber i Eagle	Program Gerber
Průměr otvoru	0,3 – 2 mm	≤ 0,15 mm
Vzdálenost otvorů	0,7 mm	jakákoliv
HAL	2 – 40 μm	6 – 8 μm
Rychlost dodání	10 dnů	12 dnů
Hodnota rovinnosti HAL	Vysoká (horší)	Nízká (lepší)
Nepájivá maska	Viditelné povrchové škrábance - nanесena na okraje desky	Bez viditelných defektů
Defekty prokovů	Dle daného rozměru a ostrosti vrtáku	Dle daného rozměru a ostrosti vrtáku
Cena	dražší	Levnější o 1/4 ceny
Otřepy po frézování	značné	V mezích normy
IPC-A-600 třída 2	nevyhovující	vyhovující

5.7 Proces osazování

Automotive Lighting obvykle využívá ze 4 různých možností osazení DPS. První dvě možnosti jsou ve firmách Safiral a Esika. Další dvě možnosti jsou přímo v AL a je to ruční osazení a interní osazení na osazovačce. Osazení ve firmě Safiral je cenově nepřijatelné a proto se tato možnost testovat nebude.

Jelikož při výrobě DPS se může nahromadit vlhkost v laminátu, doporučují výrobci před samotným osazením desky vždy vysušit. Lze tak předejít většině problémů s osazením, funkcí i spolehlivostí DPS. Pro vysušení lze použít dva různé typy pecí. První je vysokoteplotní pec s proudícím vzduchem, druhá je vakuová sušicí pec. Nastavení parametrů i délky sušení je závislé na stavbě DPS, typu materiálu, povrchu, době do osazení i designu. Celý proces sušení včetně veškerých doporučení je souhrnně popsán v normě IPC-1601. Pro případ AL je použit materiál IS400, ten se doporučuje sušit 8 a méně hodin před samotným zahájením osazování, sušení musí probíhat při teplotách 130 °C po dobu

120 minut. Sušení dle parametrů proběhlo ve firmě Esika. V AL dochází pouze k sušení DPS před procesem nanesení nepájivé masky, nikoliv sušení celé desky.

5.7.1 Technologické možnosti

Každá z firem disponuje jiným technickým vybavením a má jiné požadavky na data i na dodávané součástky. V podstatě všechny firmy chtějí dodat Gerber nebo Eagle data plošek, na které se má nanášet pasta. Také potřebují Gerber data, která zajistí veškeré informace o vrstvách DPS a data s polohou, kde se nachází zaměřovací body. Firmám se dodává soubor se souřadnicemi středů součástek a jejich rotací, s označením typu součástek a jejich hodnotami včetně pouzdra.

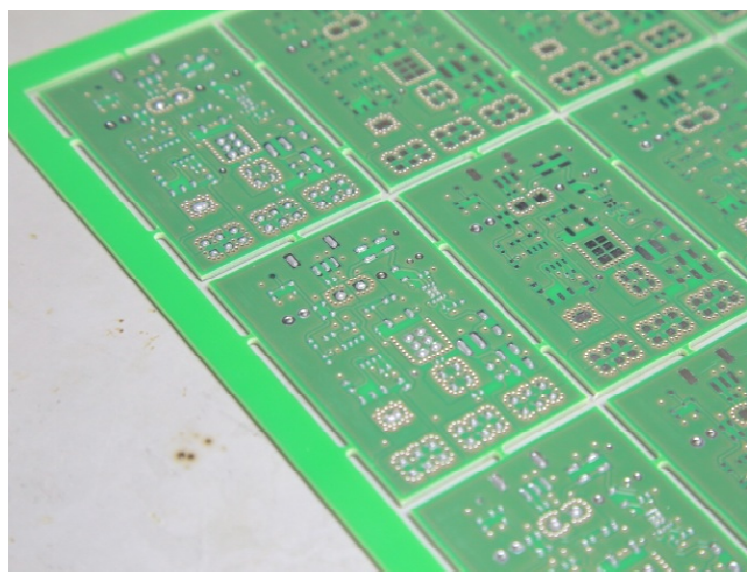
Zároveň s daty potřebují externí osazovací firmy obdržet samotné komponenty pro osazení. Je to i jedna z nevýhod externích firem, jelikož většinou nemají všechny potřebné komponenty skladem a je nutné jim připravit a dodat komponenty se samotnou deskou DPS. Příprava komponent je velice časově náročná, jelikož je nutné systematické uspořádání komponent a nutnost aby se v nich orientovala obsluha osazovacího stroje. Při přípravě součástek je třeba stříhat pásy nejméně o 5 cm navíc (6-8 pozic 0603), aby se spolehlivě daly vložit do podavače součástek tzv. feederu (obr. 52). Páska nesmí být přehýbána, jelikož feeder by součástky díky tomu nemusel posouvat. Další z možností je zaslání celých kotoučů součástek, kdy osazovací firmy zbytek součástek navrátí s osazenou deskou.



Obrázek 52: Feeder / podavač součástek

- **Nanášení pasty**

Esika využívá k nanášení pasty JET-printer. JET printing je označení technologie speciálních tiskáren pasty. Při nanášení se pasta dávkuje přes trysky dispenzeru neboli dávkovače. Stroj má na každé pouzdro a na každou součástku definované množství pasty. Každý pad může být optimalizován na objem nanesené pasty, pozici dle souřadnic, výšku, tvar a pokrytí padu. Není třeba vytvářet drahou šablonu pro malosériovou výrobu.



Obrázek 53: Nanesená pasta na levých deskách

V AL probíhá nanášení pasty ručně pomocí dispenzeru, kde není možno řídit přesně definované množství pasty a záleží pouze na zkušenosti obsluhy.

- **Osazování**

V obou případech firem je možné osazovat strojově součástky běžně 0603 a pouzdra s roztečí 0,5 mm. Limitní jsou součástky velikosti 0402 a pouzdra s roztečí 0,4 mm. Bohužel pro rezistory MELF v AL není vhodný uchopovací nástroj do osazovacího zařízení, proto je třeba tyto součástky osazovat ručně. U pouzder s malou roztečí vývodů vznikají vysoké nároky na přesnost nanášení pasty a tím pádem nelze uplatnit ruční nanášení dispenzerem pro takto malá pouzdra. Řešením je použití šablony, nebo JET-printru.

Obě z firem mají svoje možnosti a různé požadavky na plošný spoj. Nejmenší šířka a délka desky je v AL definována na 70 x 50 mm a maximální rozměr je: 443 x 508 mm. V Esice je nejmenší rozměr desky 65 x 50 mm a maximální rozměr 400 x 400 mm. Podavač stroje potřebuje v obou případech dvě opracované rovnoběžné strany a technologické okolí pro upnutí desky, které se po opracování odlomí. V případě že nemáme technologické okolí desky, je třeba tomu uzpůsobit plošný spoj a nechat nejméně 3,5 mm od okraje desky.



Obrázek 54: Barevně odlišené jednotlivé feedry slouží ke správnému přiřazení daného pásku na správnou pozici

Dále se ověřuje, zda pouzdro leží na pozici podle nahranych dat. Aby osazovací přístroj byl schopen určit polohu panelu a polohu desek, je třeba určit nejméně dva zaměřovací body na desce co nejdále od sebe. Na tvaru bodu nezáleží, nicméně osvědčený je kroužek 1 mm odmaskovaný 3 mm kolem, bez otvoru a bez pasty. Okolí tohoto bodu by mělo být prázdné, aby kamera dokázala tento bod hladce identifikovat. Tyto zaměřovací body jsou třeba u většiny osazovacích zařízení, tedy jak v AL, tak v Esice.

- **Pájení**

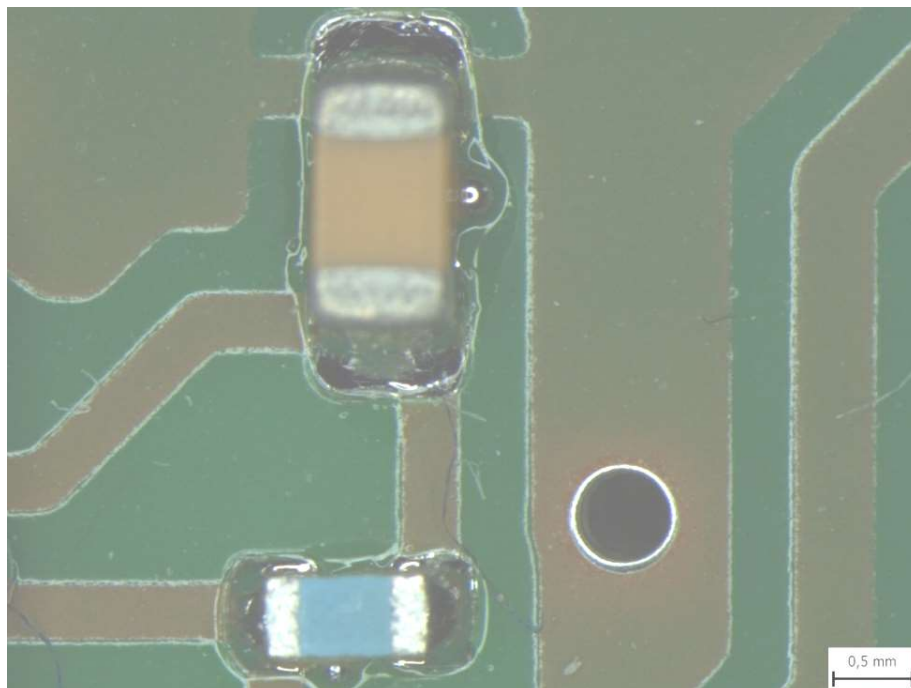
Esika nabízí pájení v parách, bez přístupu vzduchu, což umožní mnohem spolehlivější proces řízení teploty profilu oproti běžné pájecí peci LPKF Protoflow v AL, která pájí horkým vzduchem. Klasické vývodové součástky jsou v obou případech osazovány ručně, stejně tak i jejich zapájení.

5.7.2 Kontrola procesu osazování a pájení

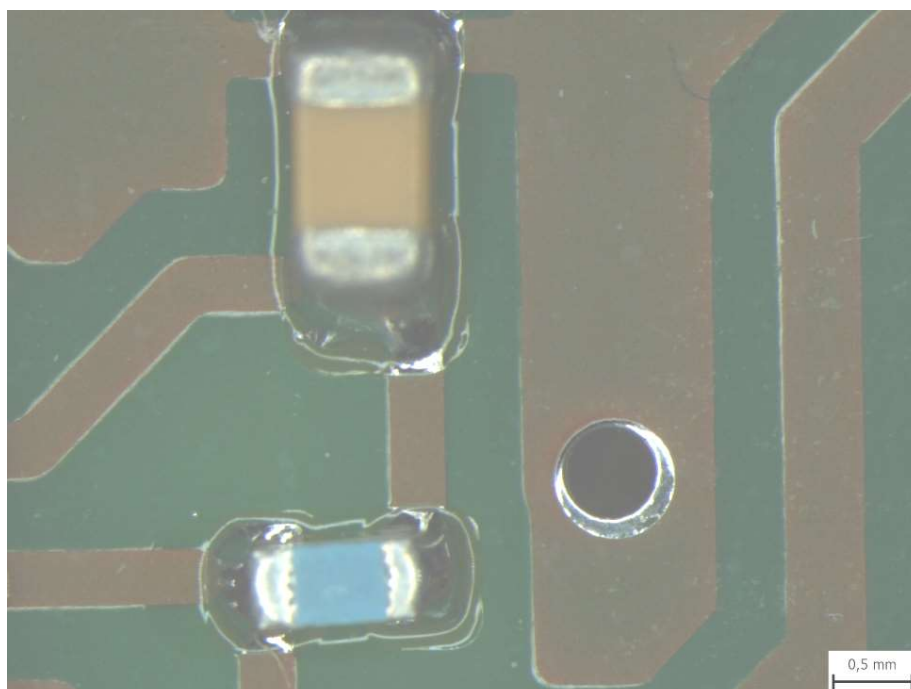
- **Kontrola vytipovaných míst**

V tomto kroku došlo k vytipování několika různých komponent na deskách a jejich vyhodnocení z pohledu pájení a správného pozicování přístrojem. Vyhodnocení se provádělo pomocí mikroskopu OLYMPUS SZX7. V případě bližšího zkoumání byl daný komponent rentgenován. Na základě předchozích zkušeností byly vytipovány a kontrolovány součástky 0603, 0402 a pouzdra: DFN-8, SO-8.

Na desku z Gatemy, osazené v AL bylo nanášeno velké množství pájky a při pájení vznikly kuličky pájky tzv. "solder balls".



Obrázek 55: Velké množství pájecí pasty

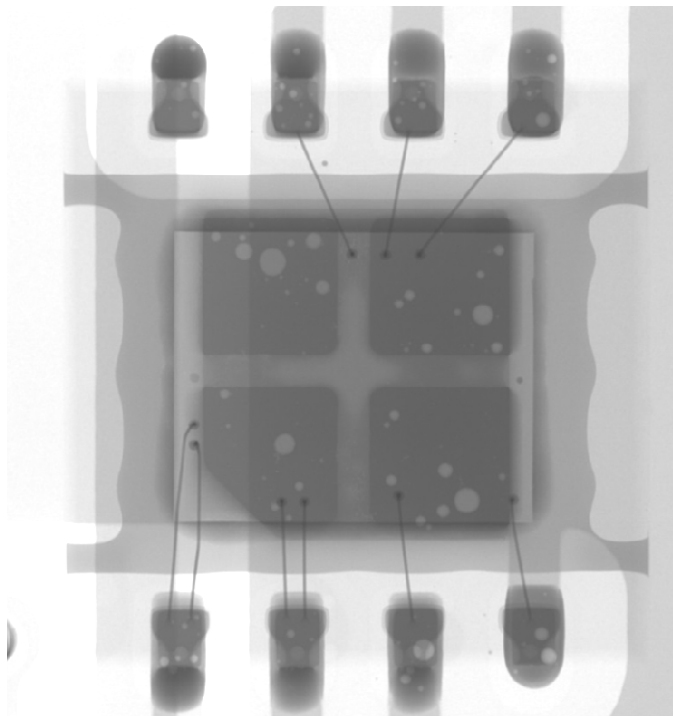


Obrázek 56: Správné dávkování disperzerem pájecí pasty na desce z Pragoboardu

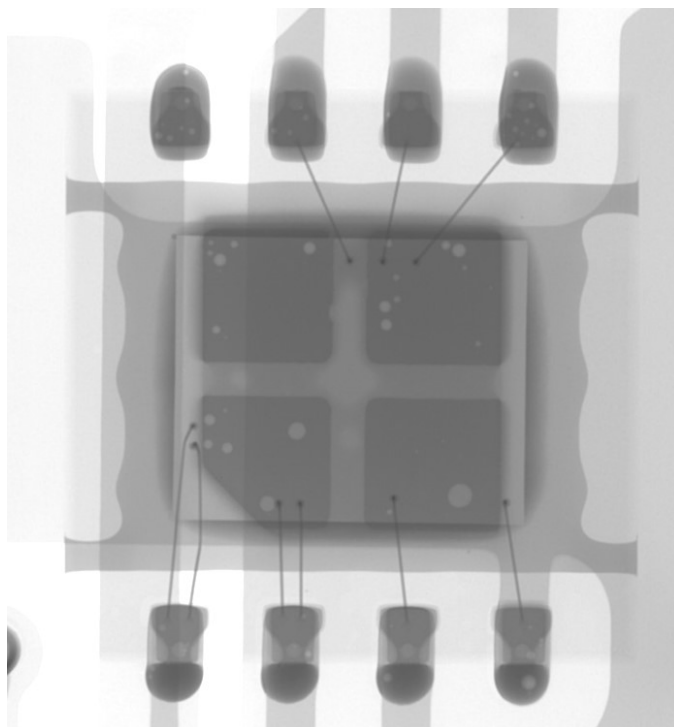
Na osazených součástkách 0602 v Esice nebyly shledány žádné vizuální defekty. Jako negativum této a jiných externích osazovacích firem je to, že jsou legislativně nuceny používat bezolovnaté pájky, které mají horší vlastnosti oproti olovnaté pájce používané v AL.

- Rentgenová kontrola pouzdra DFN-8 rozteč mezi vývody je 0,5 mm:

Rentgenový Snímek desky z Pragoboardu, osazený v Esice. Dostatek pájky na všech padech, přesné usazení komponentu osazovačkou, vývody sedí na padech, viditelné dutiny, tzv. "voidy" uvnitř pájeného spoje, na zemnicích ploškách pod pouzdrém i na vývodech součástky.

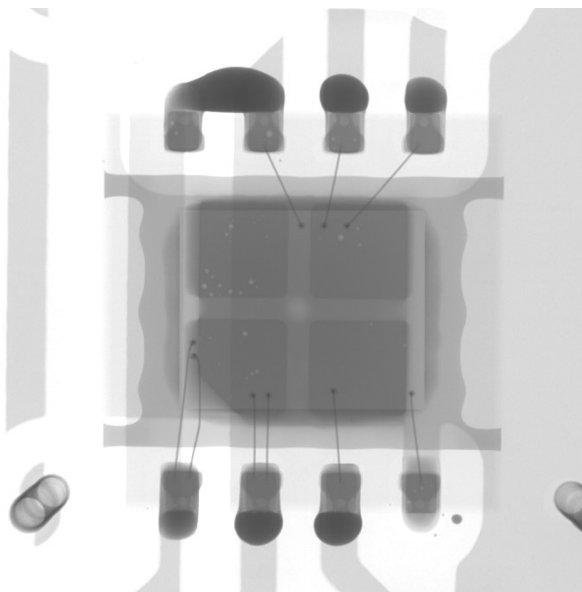


Obrázek 57: Rentgenový snímek pouzdra DFN-8 osazení Esika deska Pragoboard

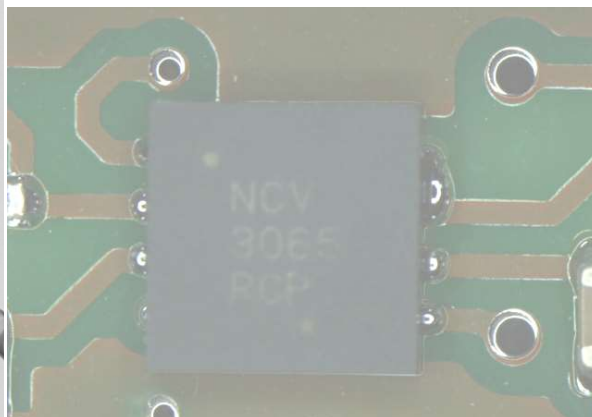


Obrázek 58: Rentgenový snímek pouzdra DFN-8 osazení Esika deska Gatema

DPS z Gatemy, osazená v Esice - dostatek pájky na jednotlivých vývodech, viditelné voidy na zemnicích padech, dobré usazení pouzdra na pady s minimální odchylkou.

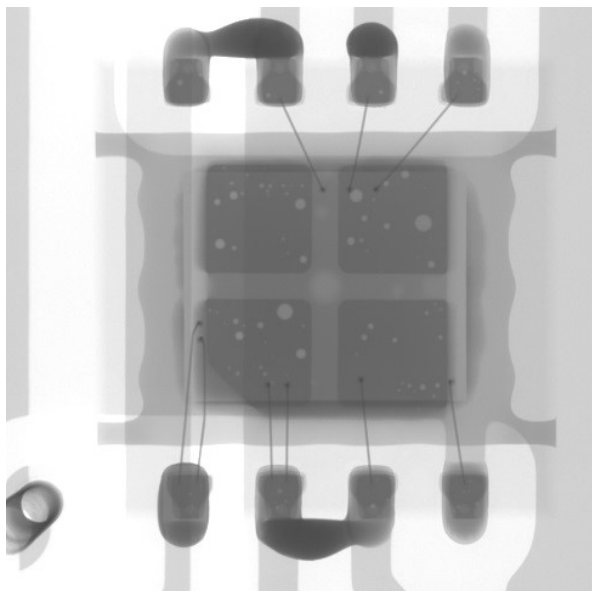


Obrázek 59: Rentgenový snímek pouzdra osazeného v AL deska Pragoboard



Obrázek 60: Zapájené pouzdro osazené v AL deska Pragoboard

Jasně viditelný zkrat mezi vývody, špatně nadávkovaná pájecí pasta. Na některých vývodech je pájecí pasty přebytek, na některých nedostatek. Minimální vodivost, způsobená zejména použitím olovnaté pájky.



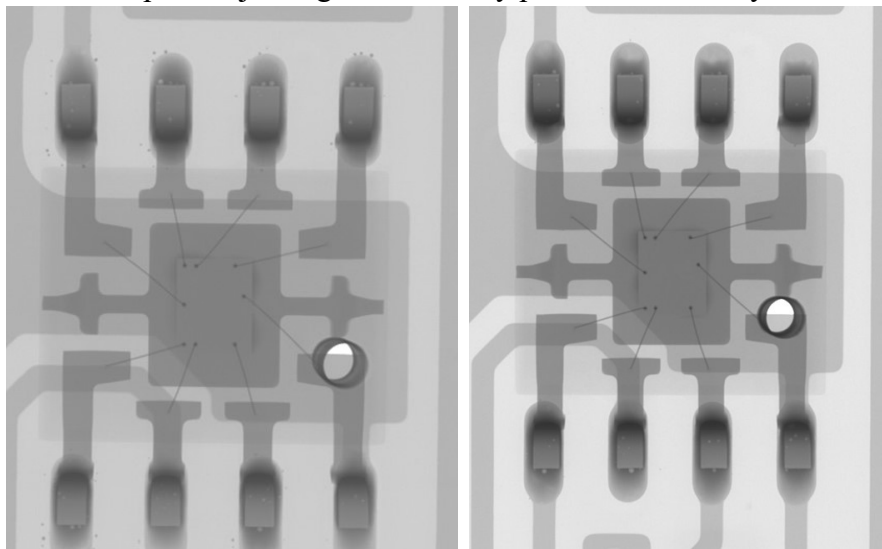
Obrázek 61: Rentgenový snímek pouzdra osazeného v AL deska Gatema



Obrázek 62: Zapájené pouzdro osazené v AL deska Gatema

Zkratky mezi vývody způsobené špatným dávkováním pájecí pasty, viditelné voidy na zemnicích ploškách. S omezenými možnostmi lze zkratům předcházet volbou tenčí jehly a snížením tlaku pro pomalejší nanášení pájecí pasty. V případě vzniku zkratu mezi vývody

lze tento problém řešit několika způsoby. Lze přidat větší množství pájky, pro vytvoření tzv. "solder ball", který efektivně umožní přenos tepla mezi pájecím hrotem a pájeným místem a poté lze využít odsávací lanko tzv. licnu a při prohřátí odstranit (odsát) přebytek nechtěné pájky. Dalším zkoumaným prvkem bylo pouzdro SO-8 s roztečí vývodů 1,27 mm. V Esice proběhlo osazení a zapájení bez defektů a voidů s dokonalým usazením součástky. Důležitým poznatkem je, že pomocí disperzeru se daří nanášet pájecí pastu pro součástky s roztečí 1,27 mm, což potvrzují rentgenové snímky pouzder osazovaných v AL.



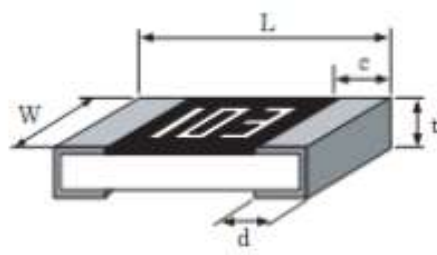
Obrázek 63: Rentgenový snímek osazené desky od Gatemy (vpravo) a Pragoboardu (vlevo)

Integrované obvody s roztečí $\leq 0,65$ mm jsou nazývány "fine pitch". Tyto pouzdra v AL není možnost zapájet ani osadit ručně. Pouze v případě použití šablonového tisku a osazovacího stroje lze dosáhnout větší přesnosti a interně je osadit v AL. Mezi tyto pouzdra patří BGA, která se používají pro nejmenší rozteč 0,5 mm, dále součástky s vývody L, J a gull wing, které se nejčastěji používají s roztečemi 0,65 mm a 0,5 mm. Menší součástky jsou například pouzdra typu LCC, kde je možné se setkat s roztečí 0,4 mm a 0,3 mm, ale ty nebývají běžné v automobilovém průmyslu.

Pasivní součástky s metalizovanými elektrodami na stranách dokáže jak Esika, tak Automotive Lighting osadit až do velikosti 0402 strojově. Nanášení pasty manuálně pomocí disperzeru pro součástky 0402 lze provést s velkou opatrností i s jejich ručním osazením zkušeným pracovníkem. I přes malou velikost součástky lze po osazení a zapájení získat kvalitně osazenou a zapájenou komponentu. Z časového hlediska ruční osazování takto malých prvků nedává smysl a je určeno pouze pro dílčí opravy na DPS. Bezproblémové jsou součástky velikosti 0603 a větší.

Tabulka 7: Standardní rozměry čipů

Označení čipu	L [mm]	W [mm]	t [mm]	d [mm]
0603	1,60	0,80	Proměnlivá	0,25 – 0,30
0402	1,00	0,50	Proměnlivá	0,25
0201	0,60	0,30	Proměnlivá	0,15
01005	0,40	0,20	Proměnlivá	0,10



Obrázek 64: Rozměry čipů

5.8 Klimatické testy

Dalším krokem v porovnávání vzorků bylo tzv. teplotní šokování v klimatické komoře Voetsch VCS 7048-15. Díky tomu mohla být pozorována materiálová stálost DPS, kvalita pájení, vnitřní struktura prokovů a další nevratné změny. Do komory bylo umístěno 6 neosazených vzorků a 4 osazené vzorky. Neosazené vzorky se lišily výrobcem tj. Gatema, Pragoboard a Automotive Lighting, přičemž byly 2 vzorky z každé firmy a jeden se z komory vyjmul po 200 cyklech a druhý až po 400 cyklech. U všech vybraných vzorků byla velikost prokovu 0,5 mm. U osazených vzorků byly dva výrobci desek a dvě firmy pro osazování, od každé desky byl jeden kus, jmenovitě jsou rozepsány v tabulce 8.



Obrázek 65: Vzorky připravené na termální šokování

Tabulka 8: Neosazené a osazené DPS v termální komoře

Neosazené DPS			Osazené DPS		
Výrobce DPS	Průměr prokovu [mm]	Termické zatížení [počet cyklů]	Výrobce DPS	Osazení a pájení	Termické zatížení [počet cyklů]
Gatema	0,5	200/400	Gatema	Esika	0/400
Pragoboard	0,5		Pragoboard	Esika	
AL	0,5		Gatema	AL	
			AL	AL	

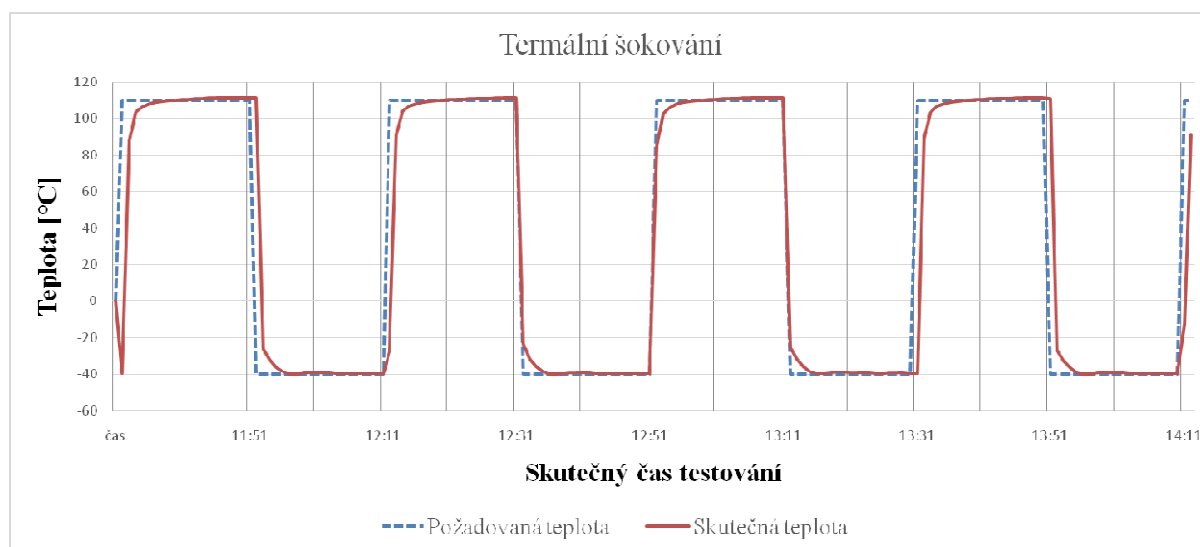
Při šokování je jeden cyklus trvající 20 minut při teplotě 110 °C obměňován opět 20-ti minutovým cyklem při teplotě -40 °C, teploty se střídají buď 200 nebo 400 opakování. V šokové komoře jsou dvě oddělená patra, mezi kterými jsou přepravovány vzorky výtahem, v každém patře je právě odlišná teplota. Při nastavení samotného procesu šokování se musí nastavit kromě základních teplot další pomocné teploty. Nastavuje se teplota před samotným zahájením šokování, teplota pro ustálení a nakonec teplota po dokončení šokování. Poslední

zmíněná teplota se především vztahuje jako bezpečností, aby nedošlo k popálení při vyjímání vzorků z komory. Zároveň se ještě musí nastavit dvě teploty pro komoru, když mají být vzorky přesunuty z jednoho patra do druhého. Tyto teploty bývají většinou vyšší (u kladných hodnot teploty) nebo nižší (u záporných hodnot teploty), jelikož materiál v předchozím patře akumuloval jeho teploty a po přesunutí do jiné teploty bude vzorek teploty vyzařovat, to znamená mírné ztráty na vyrovnání teploty mezi vzorkem a okolím v komoře.

Tabulka 9: Specifikace jednotlivých cyklů

Specifikace	Počet cyklů	Teplota pozic [°C]	Doba setrvání v pozici [min]
1	200	-40/110	20/20
2	400	-40/110	20/20

Na obrázku 66 je znázorněn graf, z kterého lze vyčíst průběh skutečné a požadované teploty testování. Z průběhů je vidět, že dochází k pozvolnějšímu zahřívání i ochlazování vzorků. K tomuto jevu dochází kvůli dvěma faktorům. První je samotný přesun výtahem mezi dvěma komorami s extrémně rozdílnými teplotami a druhým je již zmíněná akumulace tepelné energie a její pozdější vyzařování.



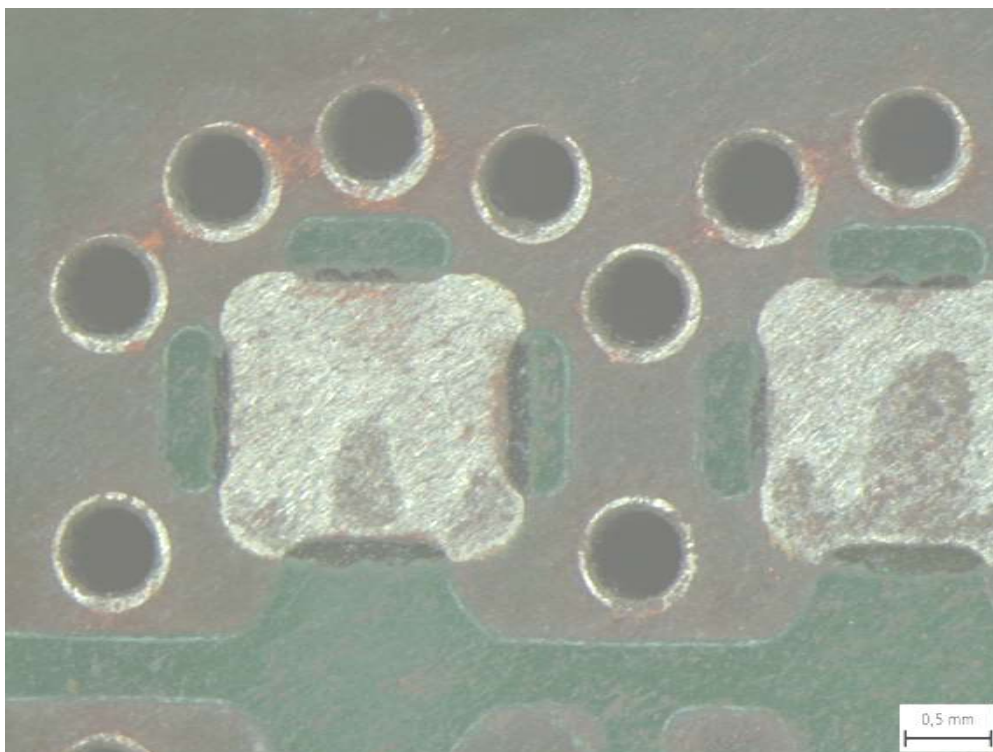
Obrázek 66: Graf požadované a skutečné teploty termálního šokování

• Vizuální defekty

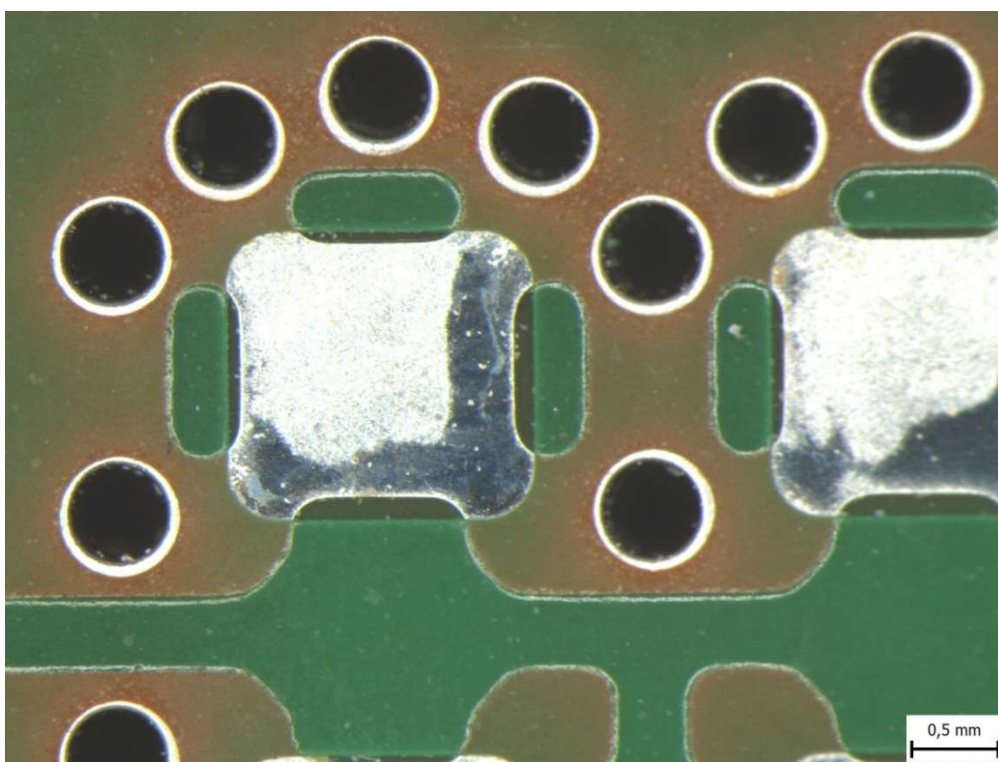
Při vyjmutí desek z šokové komory po 200 cyklech bylo zjištěno, že povrch desek firmy Gatema byl napaden povrchovou korozí. Na obrázku je vidět mírná koroze na části DPS, která při zavěšení desky v šokové komoře byla nejnižší položenou. Zavěšení desek v šokové komoře bylo zvoleno z důvodu řádného prohřátí DPS skrz celou strukturu, k čemuž by nemuselo dojít při položení vzorků na kovovou mřížku, která má také svoji tepelnou vodivost.

Lze se domnívat, že došlo k povrchové oxidaci, jelikož vzduch přiváděný do komory obsahuje vzdušnou vlhkost. Došlo ke kondenzaci vodních par obsažených ve vzduchu na desce, kvůli změnám teploty. Gravitační síla stáhla vlhkost do nižších poloh na deskách a tím vytvořila dostatečně tenký film pro vznik povrchové koroze. Také se lze domnívat, že následky koroze jsou takto nízké, jelikož při každém vstupu do nízké teploty vlhkost zmrzla a koroze se zastavila. Nicméně je i možné, že při střídání teplot docházelo k rozpínání a smršťování

objemu vodního filmu, tudíž vlivem tahového napětí mohlo dojít i k mikro prasklinám na povrchu nepájivé masky. Při vyndání dalších vzorků po 400 cyklech, korozi obsahovala deska z Gatemy po celé své ploše.



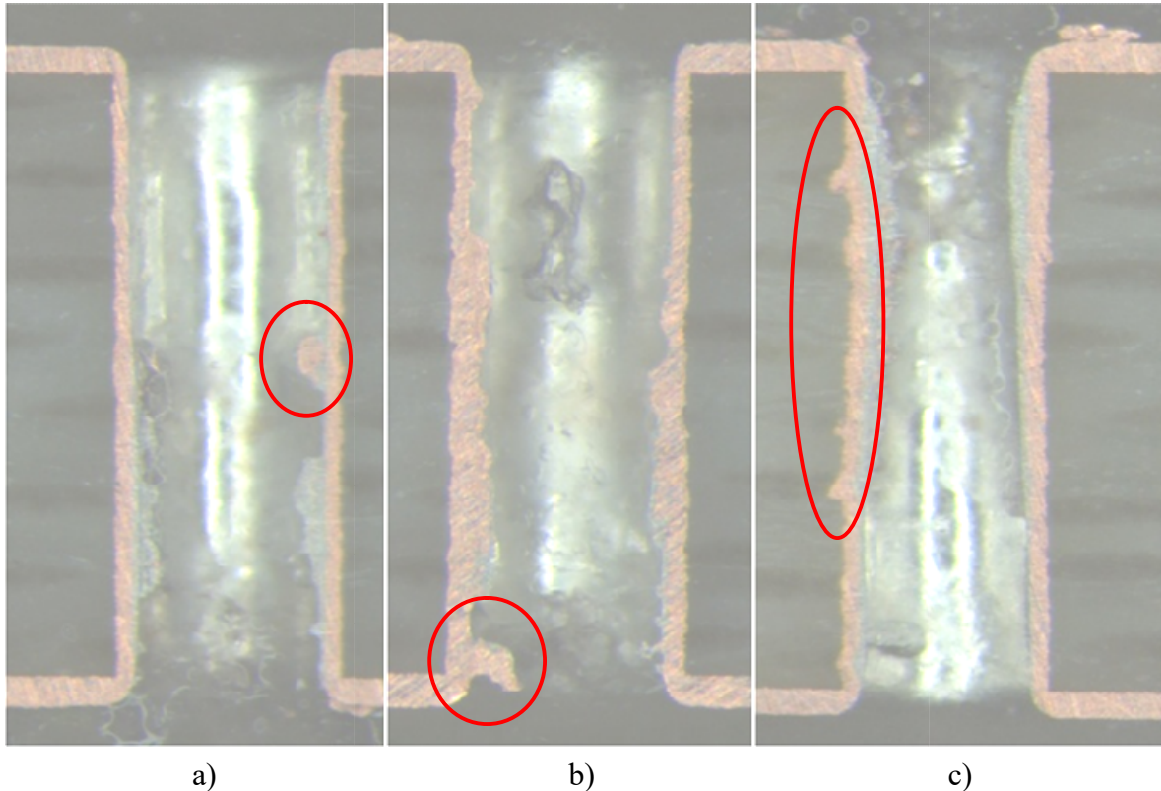
Obrázek 67: Povrchová koroze na části DPS



Obrázek 68: Povrch desky z Gatemy bez termálního šokování

• Testování prokovů

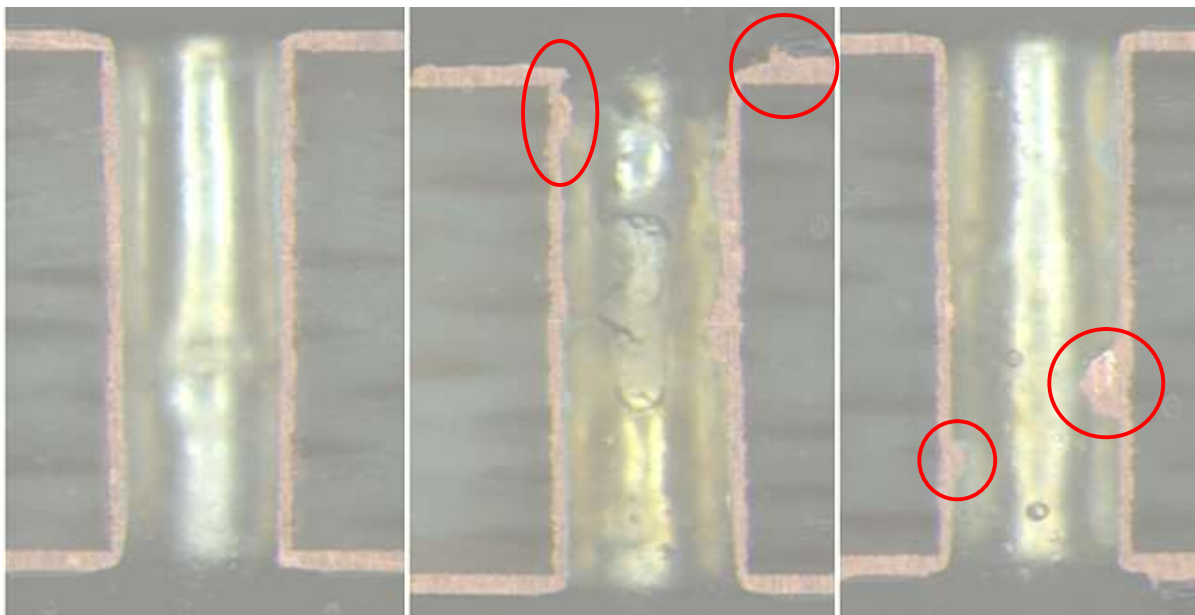
Po testování v klimatické komoře byly neosazené DPS podrobeny mikrovýbrusu, aby mohly být vzorky vyhodnoceny. Vyhodnocení bylo prováděno pod mikroskopem, kdy byl zaměřen vždy stejný prokov. Mikroskop typu OLYMPUS SZX7 byl nastaven na 50x přiblížení. Snímky byly pořízeny pomocí softwaru QuickPhoto Industrial 3.0. Nasvětleno pomocí 4 segmentového prstencového LED osvětlení.



Obrázek 69: Prokovy od Gatemy po termálním šokování – a) 0, b) 200, c) 400 cyklů.

Na obrázku 69 lze vidět prokovy:

- a) Bez termálního šokování:
 - Zbytky mědi stěn prokovu,
 - dokonalý prokov bez defektů.
- b) Po termálním šokování 200 cyklů:
 - Viditelnost mědi - vzorek nebyl zcela broušen či leštěn pod úhlem 90°,
 - viditelné stopy po broušení - nedostatek technologických kroků,
 - stěna prokovu zasahující do průměru otvoru tzv. Nodule - tento jev může být zaměnitelný s nesymetrií broušení.
- c) Po termálním šokování 400 cyklů:
 - Zatečení mědi po vláknech tzv. "Wicking",
 - nepatrná tendence deformace stěny v ose Z,
 - nečistoty na povrchu desky.



a)

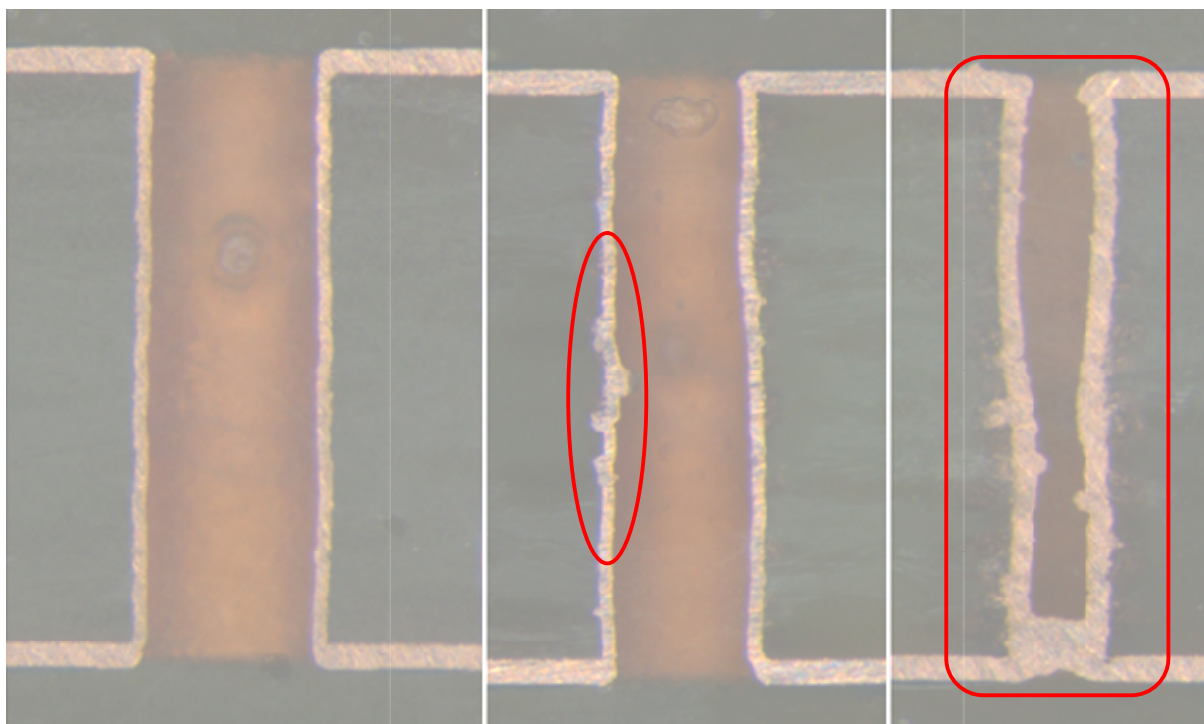
b)

c)

Obrázek 70: Prokovy od Pragoboardu po termálním šokování – a) 0, b) 200, c) 400 cyklů.

Na obrázku 70 lze vidět prokovy:

- a) Bez termálního šokování:
 - Prokov je bez viditelných defektů.
- b) Po termálním šokování 200 cykly:
 - Nečistoty mědi na povrchu,
 - vzduchové bubliny dentakrylu,
 - nesymetrické broušení – prokov nemusí být vybroušen ve svém středu,
 - zbytky stěn prokovu,
 - otřep po vrtání tzv. Burr,
 - stěna prokovu zasahující nepatrně do průměru otvoru tzv. Nodule – tento jev může být zaměnitelný s nesymetrií broušení.
- c) Po termálním šokování 400 cykly:
 - Stěna prokovu zasahující do průměru otvoru tzv. Nodule 2x - tento jev může být zaměnitelný s nesymetrií broušení,
 - zbytky mědi na povrchu.



a)

b)

c)

Obrázek 71: Prokovy od AL po termálním šokování – a) 0, b) 200, c) 400 cyklů.

Na obrázku 71 lze vidět prokovy:

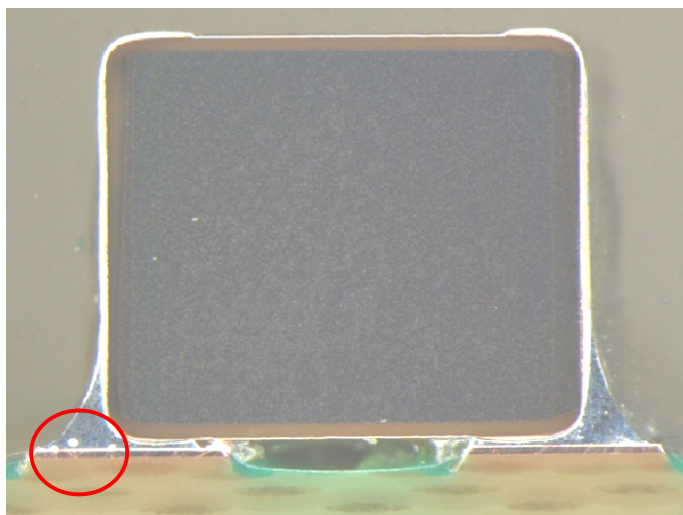
- a) Bez termálního šokování:
 - Vzduchová bublina v dentakrylu.
- b) Po termálním šokování 200 cykly:
 - Zatečení mědi po vláknech tzv. "Wicking",
 - nepatrná tendence deformace stěny v ose Z,
 - mírná nesymetrie hran prokovu.
- c) Po termálním šokování 400 cykly:
 - Značná nesymetrie a kroucení hran prokovu,
 - zatečení mědi po vláknech tzv. "Wicking",
 - nesymetrické broušení – prokov není vybroušen ve svém středu.

- **Sledování pájeného spoje během šokového testu**

Jelikož při teplotním namáhání každý materiál pracuje vlivem teplotní roztažnosti, není tomu jinak ani u DPS a součástek. Použitý materiál v testu skelný laminát (FR4) má teplotní roztažnost TCE ve směru kladení vrstev skelné tkaniny téměř dvakrát větší než keramické materiály, které se používají pro konstrukci rezistorů a kondenzátorových čipů. Jako příklad na zkoušené desce jsou keramická čipová pouzdra velikosti 1210 (3,1 x 2,6 mm), která jsou pájena na DPS z materiálu FR4. V důsledku mechanického namáhání způsobeným šoky může dojít k poškození součástky, nebo se naruší struktura pájeného spoje, případně se utrhne pájecí ploška na plošném spoji. Nebezpečí těchto jevů se zvyšuje u rozměrnějších součástek a prakticky u rozměrů větších jak 5 mm se stává kritické.

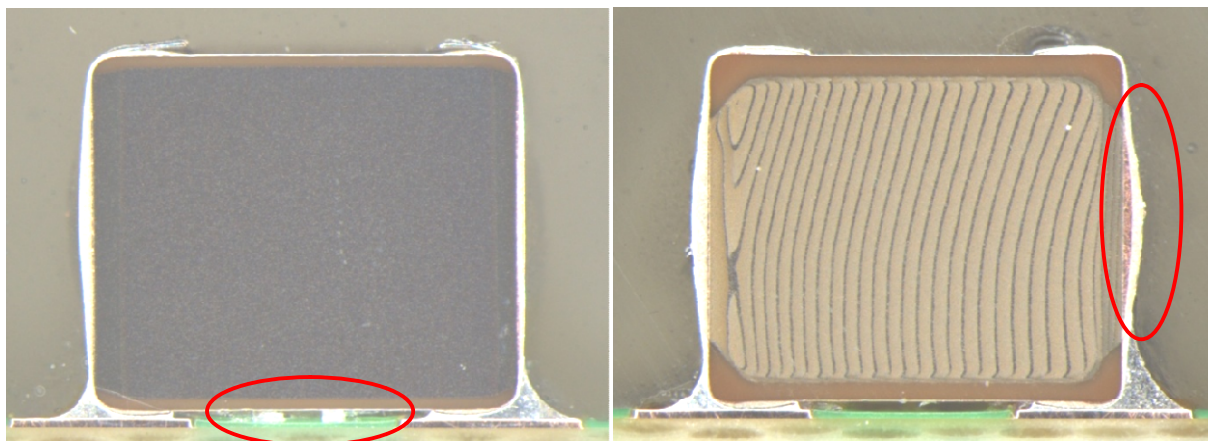
S fenoménem teplotní dilatace se zabývá i Automotive Lighting. Zde je nejčastější problém menší roztažnost LED diody oproti běžně používanému základnímu materiálu FR4. Pnutí lze zmírnit volbou vhodnějšího materiálu, který má podobnou teplotní roztažnost jako pájená součástka. V následujícím termálním testu byl vytipovaný keramický kondenzátor velikosti 1210 s operačními teplotami + 125 °C až - 55 °C. Cílem testu bylo vyhodnotit pájený spoj po 400 cyklech šokového namáhání a identifikovat případné defekty. Všechny vzorky byly pozorovány jednotným zvětšením 25x mikroskopem OLYMPUS SZX7.

Vzorek DPS vyrobený a osazený v AL (obr. 72), má překvapivou kvalitu pájeného spoje i po 400 cyklech šokového namáhání. Dobrá smáčivost, lesklost pájky, avšak nález dutiny v pájeném spoji. Hlavní zásluhou takto dobrého spoje je fakt, že byla nanesena olovnatá pájecí pasta. Je nutné podotknout, že pájecí pady na desce jsou bez povrchové úpravy. Rozdíl mezi termálně namáhanou deskou a deskou bez šokování je pouze ve vyskytujících se dutinách, které nemusí mít přímou příčinu v termálním namáhání.



Obrázek 72: Vzorek vyrobený a zapájený v AL, testovaný 400 cyklů

Vzorek vyrobený v Gatmě s povrchovou úpravou HAL osazený v Esice bez termálního šokování má podstatně lesklejší povrch oproti termálně namáhanému vzorku. Patrné jsou kuličky pájky pod SMD součástkou.



Obrázek 73: Vzorek vyrobený v Gatemě, zapájený v Esice bez šokování (vlevo) a po 400 cyklech šokování (vpravo)

Vzorek vyrobený v Gatemě s povrchovou úpravou HAL osazený v Esice termálně namáhaný 400 cykly (obr 73 vpravo). Vlivem působení rozdílných teplot na součástku se zde vyskytuje delaminace elektrod vlivem roztažnosti. Mikropraskliny v pájeném spoji nejsou viditelné. Struktura pájky je matnější s krystalovou strukturou. Na levém padu součástky se nachází menší množství pájky, které může při dalším namáhání negativně ovlivnit pájený spoj. Bohužel se výbrus nepodařilo zhotovit ve stejné části vnitřní struktury čipových kondenzátorů, a proto lze spatřit na snímcích jejich různorodou vnitřní skladbu.

Vzorek vyrobený v Pragobordu zapájený v Esice (obr. 74), šokovaný 400 cyklů má horší smáčení a vzlínání pájky než ostatní, bez viditelných prasklin a defektů. V řezu je vidět, že pájka je nehomogenní a má horší strukturu.



Obrázek 74: Vzorek vyrobený v Pragoboardu, zapájený v Esice, po 400 cyklech šokování

5.9 Ověření vlastností vzorků termokamerou

Při návrhu a výrobě desek DPS je obtížné odhalit některé výrobní vady klasickými metodami optické inspekce. Teplotní pole DPS lze stanovit a vizualizovat za pomoci termografie s použitím termokamery. Tím lze odhalit i výrobní vady jak v sériové tak v prototypové výrobě.

Pro testování termokamerou se budou využívat osazené desky před a po termálním testování. V tomto experimentu dochází k ověření funkčnosti osazených desek a následnému

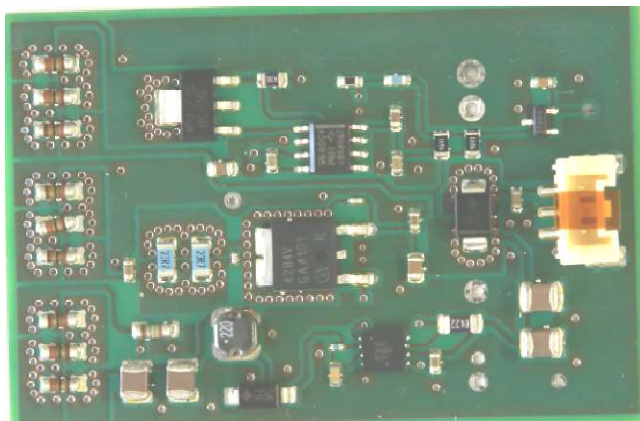
porovnání desek po termálním šokování s 400 cykly. Desky osazené v AL byly z testu vyloučeny z důvodu zkratů pod pouzdry DFN-8. Důraz je kladen zejména na správnost návrhu, funkčnost desek vydaných z termálních komor, rozložení layoutu, rozložení teplotního managementu a na vzniklé defekty při cyklování.

Při testování byly desky připojeny na DC napětí 12 V a ponechány k ustálení teploty po dobu 45 minut.

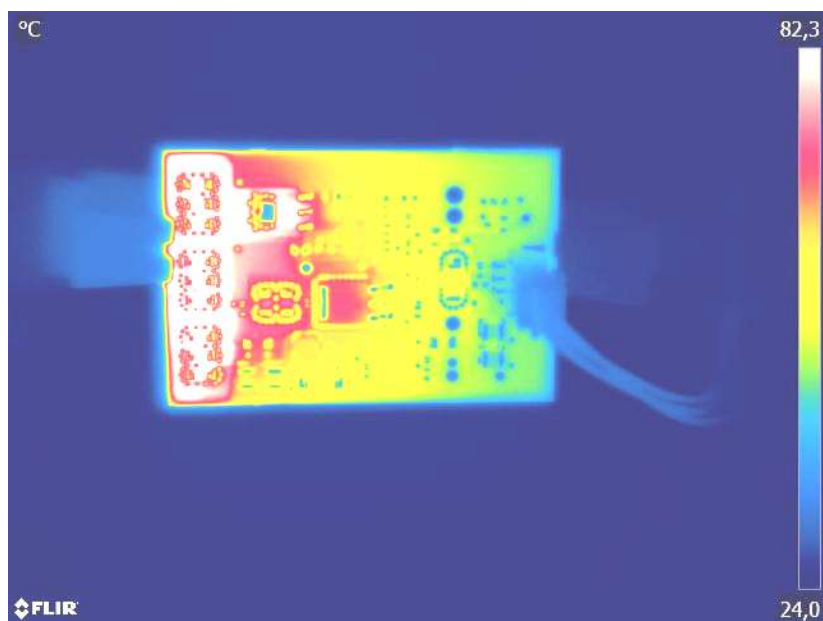
Všechny testované vzorky jsou plně funkční a vykazují totožné vlastnosti.

Dosažená teplota na zátěžových rezistorech MELF se pohybovala kolem 80 °C, což je dostatečně pod hranicí maximálních 155 °C. Ostatní součástky byly prohřáté zejména od těchto výkonových rezistorů, pokud se nacházely v jejich blízkosti, avšak jejich teplota odpovídala běžné pracovní teplotě. Pokud by i ostatní součástky byly nadměrně zahřívány, byla by na místě změna návrhu, nebo lze přidat nános teplovodivé pasty s chladičem, který bývá umístěný pod deskou.

Každý povrch má odlišnou emisivitu a změřené výsledky nemusí být dokonale přesné. Pro dosažení jednotné emisivity se na povrch DPS nanese vrstva barvy, která zajistí jednotnou emisivitu pro celou desku. Díky tomu lze získat objektivní srovnání všech komponent na desce a rozložení teplot samotné desky. V praxi se tato metoda nepoužívá z důvodu znehodnocení DPS. Pro důkladnější kontrolu se na podezřelé místo nalepí termočlánek, který umožní přesné sledování teploty v daném bodě. Nicméně zkoumání teploty pomocí termočláneků nebylo v práci provedeno, jelikož ke zjištění základních parametrů postačuje termokamera.



Obrázek 75: Osazená deska pro zkoušení termokamerou.



Obrázek 76: Zkoušení desky termokamerou

Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou výroby vývojových vzorků pro automobilové prostředí, konkrétně analýzou některých technologií používaných na R&D AL. Úvodem je naznačeno seznámení s technologií světlometů a základní popis LED driveru, které světlomety obsahují. Dále jsou zde rozebrány normy IPC-A-600 a IPC-A-610, pomocí kterých probíhá hodnocení kvality osazených a neosazených desek plošného spoje. Jsou zde popsány technologické postupy, jako je metalografický výbrus, rentgenová kontrola a klimatická komora. Práce popisuje možné defekty a chyby, které lze jednotlivými technologiemi testování pozorovat.

V první části práce je připravena teoretická základna pro následné testování vývojových vzorků DPS. V praktické přípravě došlo k návrhu layoutu v návrhovém programu Cadence Allegro DPS, kdy byl kladen důraz zejména na různorodost desky, aby bylo co nejvíce pozorovatelných jevů pro testování. Při samotném uspořádání komponentů na desce bylo přihlíženo k teplotnímu managementu a také k následnému vyhodnocování desky pomocí metalografického výbrusu a rentgenové kontroly.

Pomocí dostupné technologie byly vývojové vzorky zhotoveny v interní laboratoři pro prototypovou výrobu EEG na R&D Automotive Lighting. Vyhodnocení vzorků proběhlo pomocí metalografického výbrusu a následného zkoumání pod mikroskopem. K často pozorovaným defektům patřilo zejména špatné sesouhlasení motivu s deskou, zatečení nepájivé masky do otvorů, nebo různorodost kvality vrtaných otvorů, jimiž se práce zabývala podrobněji. Namísto sledování ostrosti pomocí zvětšovacího skla došlo k zavedení systémového sledování životnosti vrtacích cyklů pomocí softwaru. Hlavní sledované parametry jsou počet vyvrtaných děr u vrtáků a ujetá vzdálenost frézou dle parametrů výrobců. Ověření kvality proběhlo pomocí mikrovýbrusu.

Další část práce se zabývá objektivním srovnáním výrobců DPS pro firmu AL v souladu se stanovenou metodikou kontroly kvality podle IPC-A-600. V tomto srovnání vyšla nejlépe firma Pragoboard, která měla kvalitnější provedení nepájivé masky, nižší rovinnost a přijatelnější cenu. Bohužel přesnost vrtaných otvorů v souřadnicovém systému X, Y na desce je u Pragoboardu nízká. U firmy Gatema se vyskytovaly velké otřepy skelné tkaniny po frézování na okrajích desky, které nejsou vyhovující ani pro jednu třídu v IPC normě. Některé okraje desky nebyly odmaskovány a mohlo dojít při frézování k poškození nepájivé masky. Vrtané otvory mají obě firmy v podobné kvalitě, záleží na aktuálním stavu nástroje daného rozměru. Obě firmy garantují kvalitu svých desek v IPC třídě 2. Výsledky jsou shrnuty do tabulky na straně 52.

Dále navazuje pojednání o osazovaných DPS. Osazení bylo realizováno v externí firmě Esika a interně v AL na osazovacím zařízení. Esika má oproti AL dvě značné výhody, je vybavena zázemím pro sušení DPS a zároveň má k dispozici jet-printer. Experimentálně byly stanoveny nejmenší rozměrové limity pro ruční i strojní osazení v AL. Pokud se nanáší pasta manuálně pomocí dispenzeru lze osadit čipy 0402 a pouzdra s roztečemi většími než 0,65 mm.

Následoval experiment, který pomocí metalografie sledoval poruchy prokovů u neosazených desek plošných spojů po termálních zatíženích. Byly vybrány 3 výrobci DPS a to Pragoboard, Gatema a AL. Desky byly termicky namáhány v klimatických komorách po 200 a 400 cyklech, po kterých byly vyhodnoceny. Bylo zjištěno, že dochází k očekávaným

defektům v závislosti na množství teplotních cyklů. Nejvíce defektů bylo detekováno u DPS z interní laboratoře AL. Častým defektem byla zjištěna nesymetrie hran prokovů, způsobená kroucením mědi kvůli termickému namáháním. Vzhledem k problematickému zajištění rovinnosti povrchu zalitého vzorku, byly detekovány zbytky mědi v prokovech. Tento defekt vznikl kvůli nepřesnému broušení. Častým jevem byla vzduchová bublina v dentakrylu, nicméně její eliminaci lze zajistit tlakovým zařízením. Dalšími často opakovanými defekty byly otřepy po broušení či viditelné stopy směru broušení. Jelikož se na neosazených deskách vyrobených v AL nacházelo daleko více vad např. kroucení prokovů, byla nejvíce ovlivněna termálním šokováním.

Na osazených deskách, které dříve prošly termálním šokováním, byl zkoumán stav pájených spojů v souvislosti s různou teplotní roztažností komponent a samotné desky. V tomto případě vyšly nejlépe desky vyrobené a osazené v interní laboratoři AL. Hlavní příčinou je použití olovnaté pájky při samotném procesu pájení. U vzorků zapájených v Esice je patrná mírná degradace a nehomogenita pájky po šokování. U kondenzátoru na osazené desce v Esice došlo k delaminaci elektrod, tento defekt mohl být způsoben i procesem přetavení pájky.

Poslední experiment byla kontrola desek termokamerou. Byly vybrány vzorky desek, které neprošly termálním šokováním a vzorky, které jím prošly. Všechny vzorky byly následně testovány v aktivním stavu. Při tomto testu bylo zjištěno, že nedochází k nadměrnému zahřívání komponent a chladicí otvory plní řádně svoji funkci. A zároveň bylo prokázáno, že prodělané šokové testy znatelně neovlivnily teplotní vodivost vzorků.

Problematika elektromigrace byla probrána pouze v teoretickém rozsahu. Od praktického testu bylo upuštěno, jelikož výskyt těchto vad na většině projektů řešených v AL je velmi ojedinělý a případná analýza by kladla neúměrné časové nároky na vybavení. Případný test k dosažení směrodatných výsledků by měl trvání dle normy 4,5 měsíce v aktivním stavu v klimatické komoře. V šokové komoře by test byl kratší, 1,5 měsíce, avšak tyto komory nejsou uzpůsobeny pro testování vzorků v aktivním stavu. Potenciální vyhodnocování elektromigrace dostupný optický mikroskop OLYMPUS SZX7 dosahuje maximálního zvětšení 100x, což není dostatečné pro rozlišení whiskerů běžné velikosti od 1 μm do 10 μm . Případný transport DPS pro kontrolu pomocí elektronového mikroskopu by znehodnotil výsledky testu.

Podle mého názoru poskytuje tato diplomová práce důležité podněty pro další zlepšování technologií v interní laboratoři firmy Automotive Lighting a tím se může laboratoř přiblížit kvalitou výroby mezinárodním standardům IPC-A-600, kterých nyní nedosahuje. Osazování je v AL na vysoké úrovni a není potřeba využívat externích osazovacích firem. Pouze k nanášení pasty doporučuji šablonový tisk, nebo dražší variantu v podobě jet-printru což by umožnilo bezproblémově osazovat i pouzdra s roztečí 0,5 mm.

Desky plošných spojů, o kterých diplomová práce pojednává, jsou v současné době nepostradatelným prvkem moderních světlometů. S příchodem elektromobilů bude úloha desek plošných spojů ještě významnější. Už proto lze očekávat, že nároky na vysokou kvalitu vývojových vzorků nadále porostou. K identifikaci správného směru a optimalizaci technologických procesů může přispět i tato práce.

Seznam použitých zdrojů

1. KLAUZ, Milan. IPC standardy. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2011 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:11440/ipc-standardy>
2. STEJSKAL, Petr. IPC standardizace. *IPC-školení.cz* [online]. Benešov [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://www.ipc-skoleni.cz/ipc-standardy#ipc_610_detailni_popis
3. ELEKTRONICKÉ ZPRÁVY. ipc-info.org. [Online] 2. 2018. [cit. 2019-05-19] <https://ipc-info.org/cs/ipc-600-nebo-ipc-6012-jaky-standard-mel-byt-pouzit/>.
4. TOBOLA, Miroslav. Metalografický výbrus DPS: inspekční a vývojová metoda. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2011 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:6203/metalograficky-vybrus-dps-inspekni-a-vyvojova-metoda>
<https://www.dps-az.cz/vyroba/id:6203/metalograficky-vybrus-dps-inspekni-a-vyvojova-metoda>
5. *Strues ensuring certainly* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.struers.com/>
6. JANDOVÁ, Kristina. Vrtání a kontrola desek plošných spojů. *Docplayer* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/15952676-Vrtani-a-kontrola-desek-plosnych-spoju.html>
7. OTÁHAL, Alexandr a Ivan SZENDIUCH. Inovace procesu pokovení průchozích otvorů v DPS. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2016 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:22493/inovace-procesu-pokoveni-pruchozich-otvoru-v-dps>
8. HANUSOVÁ, Dana. Skryté vady desek plošných spojů – část 4. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2011 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:10741/skryte-vady-desek-plosnych-spoju-cast-4>.
9. HANUSOVÁ, Dana. Skryté vady desek plošných spojů – část 3. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2011 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:6760/skryte-vady-desek-plosnych-spoju-cast-3>
10. STARÝ, Jiří a Petr KAHLE. Plošné spoje a povrchová montáž. Vysoké učení technické v Brně [online]. 2011 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/metmel/studijni-pomucky/METMEL_11_SP_BPSM_Plosne_spoje_a_povrchova_montaz.pdf
11. ŠIMKA, Jaromír. *Celoplošné galvanické zlacení plošných spojů: Výroba DPS* [online]. 2010 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: http://www.mikrozone.sk/soubory/downloads/print/dps-az/1/vyroba-celoplosne_galvanicke_zlacení.pdf.
12. DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.
13. ČEJKA, Petr. Rentgenová defektoskopie. *Byznys.hw.cz* [online]. 2016 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://byznys.hw.cz/kvalita-a-plm/rentgenova-defektoskopie.html>

14. HWANG, Jennie S. *Environment - friendly electronics: Lead free technology*. Electrochemical Publications, 2001. ISBN 978-0901150400.
15. KRUMBEIN, Simeon J. Metallic electromigration phenomena. *TE Connectivity* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: www.te.com/documentation/whitepapers/pdf/p313-89.pdf
16. GEDEN, Bradley. Understand and Avoid Electromigration(EM) & IR-drop in Custom IP Blocks. *Synopsys*[online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: www.synopsys.com/Tools/Verification/CapsuleModule/CustomSim-RA-wp.pdf
17. Failure Mechanism of Semiconductor Devices, Panasonic Semiconductor 2009, 60 stran [cit. 2019-05-19]
18. WIKIPEDIA. Electromigration. In: *Wikipedia: The free encyclopedia* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electromigration#/media/File:Electromigration.png>
19. KIM VU, Silver Migration – The Mechanism and Effects on Thick-Film Conductors, Material Science Engineering 234 – Spring 2003, College of Engineering – Chemical and Material Science Engineering Department San Jose State University, 21 stran. [cit. 2019-05-19]
20. SOVA, Jan. Konstrukce termokamery. *Termokamera.cz* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
21. HENNINGER, Todd. DPS Surface Finishes. *Smta* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://www.smta.org/chapters/files/UMW_Viasystems_Surface_Finishes.pdf.
22. JURÁK, Karel a Zuzana NEJEZCHLEBOVÁ. Vady pájených spojů – Terminologie. *DPS Elektronika od A do Z*[online]. 2015 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:22901/vady-pajenych-spoju-terminologie>
23. ALLSTAR. Xenonové výbojky. *Autoelektrika.cz* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.autoelektrika.cz/clanky/xenonove-vybojky>
24. ŠTĚTINA, Josef. *Přenos tepla vedením*. [online] Prezentace Vysoké učení technické v Brně.
25. VOETSCH. www.weiss-technik.com. [online] <https://www.weiss-technik.com/fileadmin/Redakteur/Mediathek/Broschueren/WeissTechnik/Umweltsimulation/Voetsch/Voetsch-Technik-VC3-VCS3-EN.pdf>.

Seznam symbolů a zkratek:

AL - Automotive Lighting

BGA - Ball grid array

DPS - Deska plošných spojů

IPC - Acceptability of Printed Wiring Boards

LED - Light emitting diode

LGA - Land grid array

PCB - Printed circuit board

QFN - Quad-flat no-leads

QFP - Quad Flat Package

SON - Small-outline no Leads

Seznam obrázků

Obrázek 1: Halogenová žárovka [23].....	10
Obrázek 2: Xenonová výbojka [23]	10
Obrázek 3: Umístění LED diody na DPS [24].....	11
Obrázek 4: Termální plošky a prokovy v návrhovém programu	11
Obrázek 5: Blokové schéma budiče LED	11
Obrázek 6: Testování procesu vrtání v plátované mědi [7]	18
Obrázek 7: Princip metody reverzního pulzního pokovení [7]	18
Obrázek 8: Rentgenový snímek nehomogenního pokovení otvorů [8].....	19
Obrázek 9: Vada Measling – výskyt bílých skvrn pod povrchem základního materiálu [9] ...	20
Obrázek 10: Rentgenová kontrola [12]	22
Obrázek 11: Rentgenová kontrola QFN pouzdra	23
Obrázek 12: Voidy v BGA spoji [9]	23
Obrázek 13: Definice smáčecího úhlu [14].....	25
Obrázek 14: Síly ovlivňující pohyb iontů [18].....	27
Obrázek 15: Klimatická komora VSC 4080-10 [25]	31
Obrázek 16: Deformace prokovu v ose Z [2].....	31
Obrázek 17: Schéma zapojení v programu ORCAD	33
Obrázek 18: Rozložení návrhu na „TOP“ straně DPS	34
Obrázek 19: Rozložení návrhu na „BOTTOM“ straně DPS	34
Obrázek 20: Rozložení padů pro mikrovýbrus	35
Obrázek 21: Osazovací předpis	35
Obrázek 22: DPS po procesu vrtání	36
Obrázek 23: Lázně pro galvanické pokovení	36
Obrázek 24: Příprava desky pro galvanické pokovení.....	37
Obrázek 25: Vyhotovená DPS včetně nepájivé masky	37
Obrázek 26: Detail řezu na pile SECOTOM-50	38
Obrázek 27: Formy, akrylátová pryskyřice, tlakový hrnec	38
Obrázek 28: Brousicí a leštící zařízení Tegamin-25	39
Obrázek 29: Deska plošných spojů z interní laboratoře č. 4	40
Obrázek 30: Vzorek č. 2-A	41
Obrázek 31: Detail vzorku č. 3-A s přiblížením 50x	42
Obrázek 32: Vzorek č. 2-B.....	42
Obrázek 33: Vzorek č. 3-A	43
Obrázek 34: Vzorek č. 3-B.....	43
Obrázek 35: Detail vzorku č. 3-B.....	44
Obrázek 36: Ukázka nastavení pro vrtání	44

Obrázek 38: Sledované zkušební otvory s přiblížením 40x	45
Obrázek 37: Sledování ostrosti vrtáků pomocí softwaru	45
Obrázek 39: Průměry děr a jejich vzdálenosti u firem	46
Obrázek 40: Škrábance na DPS dodávané firmou Gatema	47
Obrázek 41: Vysoká hodnota rovinnosti u DPS	47
Obrázek 42: Otřepy na rohu desky	48
Obrázek 43: Delaminace skelných vláken	49
Obrázek 44: Prokov č. 1 průměr otvoru 0,5 mm deska Pragoboard	49
Obrázek 46: Prokov č. 2 průměr otvoru 0,4 mm a 0,3 mm Gatema	50
Obrázek 45: Prokov č. 1 průměr otvoru 0,5 mm deska Gatema	50
Obrázek 47: Prokov č. 2 průměr otvorů 0,4 mm a 0,3 mm Pragoboard	51
Obrázek 48: Nepřesnost vrtání od Pragoboardu při zvětšení 25x	51
Obrázek 49: Defekt vodivé cesty	52
Obrázek 50: Detail broušeného místa se zvětšením 40x	52
Obrázek 51: Rentgenový snímek broušeného místa.	52
Obrázek 52: Feeder / podavač součástek	54
Obrázek 53: Nanesená pasta na levých deskách	54
Obrázek 54: Barevně odlišené jednotlivé feedry slouží ke správnému přiřazení daného pásku na správnou pozici	55
Obrázek 55: Velké množství pájecí pasty	56
Obrázek 56: Správné dávkování dispenzerem pájecí pasty na desce z Pragoboardu	56
Obrázek 57: Rentgenový snímek pouzdra DFN-8 osazení Esika deska Pragoboard	57
Obrázek 58: Rentgenový snímek pouzdra DFN-8 osazení Esika deska Gatema	57
Obrázek 59: Rentgenový snímek pouzdra osazeného v AL deska Pragoboard	58
Obrázek 60: Zapájené pouzdro osazené v AL deska Pragoboard	58
Obrázek 62: Rentgenový snímek pouzdra osazeného v AL deska Gatema	58
Obrázek 61: Zapájené pouzdro osazené v AL deska Gatema	58
Obrázek 63: Rentgenový snímek osazené desky od Gately (vpravo) a Pragoboardu (vlevo)	59
Obrázek 64: Rozměry čipů	59
Obrázek 65: Vzorky připravené na termální šokování	60
Obrázek 66: Graf požadované a skutečné teploty termálního šokování	61
Obrázek 67: Povrchová koroze na části DPS	62
Obrázek 68: Povrch desky z Gately bez termálního šokování	62
Obrázek 69: Prokovy od Gately po termálním šokování – a) 0, b) 200, c) 400 cyklů	63
Obrázek 70: Prokovy od Pragoboardu po termálním šokování – a) 0, b) 200, c) 400 cyklů	64
Obrázek 71: Prokovy od AL po termálním šokování – a) 0, b) 200, c) 400 cyklů	65
Obrázek 72: Vzorek vyrobený a zapájený v AL, testovaný 400 cyklů	66

Obrázek 73: Vzorek vyrobený v Gatemě, zapájený v Esice bez šokování (vlevo) a po 400 cyklech šokování (vpravo).....	67
Obrázek 74: Vzorek vyrobený v Pragoboardu, zapájený v Esice, po 400 cyklech šokování ..	67
Obrázek 75: Osazená deska pro zkoušení termokamerou.....	68
Obrázek 76: Zkoušení desky termokamerou.....	68

Seznam tabulek

Tabulka 1: Srovnání metod dělení materiálu [5] (Časy a napadené oblasti jsou orientační)..	14
Tabulka 2: Proces přípravy	16
Tabulka 3: Srovnání druhů povrchových úprav [10] [11].....	21
Tabulka 4: Závislost smáčecího úhlu na hájitelnosti [14].....	25
Tabulka 5: Technické parametry klimatické komory VCS 4080-10	31
Tabulka 6: Tabulka srovnání firmy Gatema a Pragoboard	53
Tabulka 7: Standardní rozměry čipů	59
Tabulka 8: Neosazené a osazené DPS v termální komoře	60
Tabulka 9: Specifikace jednotlivých cyklů	60